

**PENGARUH SUDUT *DIVERGENT QUARL* PADA *SWIRL STABILIZED FLAME* TERHADAP KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI *ANNULUS JET***

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



**Disusun oleh :**

**MOCH. HABIB SUBHAN  
NIM. 0210620080-62**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**JURUSAN MESIN**

**MALANG**

**2007**

**PENGARUH SUDUT *DIVERGENT QUARL* PADA *SWIRL STABILIZED FLAME* TERHADAP KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI *ANNULUS JET***

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



Disusun oleh :

**MOCH. HABIB SUBHAN**  
**NIM. 0210620080-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.**  
**NIP. 131 756 003**

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

**PENGARUH SUDUT *DIVERGENT QUARL* PADA *SWIRL STABILIZED FLAME* TERHADAP KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI *ANNULUS JET***

Disusun oleh :

**MOCH. HABIB SUBHAN**  
NIM. 0210620080-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 26 Juli 2007

**DOSEN PENGUJI**

**SKRIPSI I**

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

**SKRIPSI II**

**Ir. Saifuddin Baedowie**  
NIP. 130 350 753

**KOMPREHENSIF**

**Ir. Bardji Hadi Pranoto**  
NIP. 130 935 863

Mengetahui :  
Ketua Jurusan Mesin

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

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul **“Pengaruh Sudut *Divergent Quarl* pada *Swirl Stabilized Flame* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Api Difusi *Annulus Jet*”** dapat terselesaikan.

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

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Mesin.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M. Sc., selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan serta meluangkan waktu untuk berdiskusi bersama penyusun dalam menyusun skripsi ini.
5. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan serta nasehat-nasehat pada penyusun dalam menyusun skripsi ini.
6. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M. Eng., yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan masukan-masukan kepada penyusun.
7. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin.
8. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
9. *To my beloved*, orang tua tercinta, Ibu Djuwariyah dan Bapak Alm. Moch. Bashor, serta seluruh keluarga tersayang.
10. *CEL Team*, teman-teman M’02 dan teman-teman Himpunan Mahasiswa Mesin FT-UB.
11. *Combustión Team ’02*, terima kasih atas semua sumbangan pemikiran serta kerjasamanya.
12. Semua pihak, yang tidak dapat penyusun sebutkan satu per satu, yang telah memberikan dorongan, semangat serta doa dalam penyelesaian skripsi ini.

Penyusun menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penyusun sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Tidak ada yang sempurna dalam setiap karya

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

Malang, Juli 2007

Penyusun



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b>	i
<b>DAFTAR ISI</b>	iii
<b>DAFTAR TABEL</b>	v
<b>DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK</b>	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	viii
<b>DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL</b>	x
<b>RINGKASAN</b>	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
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>	4
2.1. Pembakaran	4
2.2. Pembakaran Difusi	6
2.3. Penyalaan	9
2.4. Intensitas Turbulensi Aliran	10
2.5. Kestabilan Api	12
2.6. Pembakaran dengan Menggunakan Udara Berputar pada <i>Divergent Quarl</i>	13
2.7. Distribusi Kecepatan dan Tekanan pada Aliran Berputar	17
2.8. LPG ( <i>Liquified Petroleum Gas</i> )	18
2.9. Hipotesis	18
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	19
3.1. Metode Penelitian	19
3.2. Variabel yang Diukur	19
3.3. Alat-alat yang Digunakan	20
3.4. Instalasi Penelitian	23
3.5. Metode Pengambilan Data	24
3.6. Rancangan Pengolahan Data	25



3.7. Diagram Alir Penelitian	26
------------------------------	----

<b>BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN</b>	27
-----------------------------------	----

4.1. Hasil Penelitian	27
-----------------------	----

4.1.1. Kestabilan nyala api difusi <i>annulus jet</i>	27
---	----

4.1.1.1. Data penelitian	27
--------------------------	----

4.1.1.2. Perhitungan data	27
---------------------------	----

4.1.1.3. Visualisasi api	29
--------------------------	----

4.1.2. Distribusi temperatur api difusi <i>annulus jet</i>	30
--	----

4.1.2.1. Data penelitian	30
--------------------------	----

4.1.2.2. Pengukuran temperatur	30
--------------------------------	----

4.2. Pembahasan	31
-----------------	----

4.2.1. Grafik kestabilan api difusi <i>annulus jet</i>	31
--	----

4.2.2. Visualisasi api difusi <i>annulus jet</i>	34
--	----

4.2.3. Distribusi temperatur api difusi <i>annulus jet</i>	38
--	----

4.2.3.1. Distribusi temperatur berdasar sudut <i>divergent quarl</i>	38
--	----

4.2.3.2. Distribusi temperatur berdasar jarak aksial	42
--	----

4.2.4. Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i>	47
---	----

<b>BAB V PENUTUP</b>	49
----------------------	----

5.1 Kesimpulan	49
----------------	----

5.2 Saran	49
-----------	----

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi udara kering	4



## DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Difusi komponen A ke dalam komponen B	6
Gambar 2.2.	Konsentrasi spesies pada pembakaran difusi	7
Gambar 2.3.	Bentuk api difusi	8
Gambar 2.4.	Perubahan aliran dan struktur api	8
Gambar 2.5.	Fluktuasi kecepatan rata-rata	10
Gambar 2.6.	Efek <i>scale of turbulence</i> pada permukaan nyala	11
Gambar 2.7.	Skema <i>lift off</i> pada api difusi <i>jet</i>	12
Gambar 2.8.	Diagram <i>burner</i> dengan menggunakan udara berputar	13
Gambar 2.9.	Zona Resirkulasi akibat aliran <i>swirl</i>	14
Gambar 2.10.	Skema desain <i>divergent quarl</i>	14
Gambar 2.11.	Profil kecepatan aliran melalui <i>divergent quarl</i>	16
Gambar 3.1.	Variasi sudut <i>divergent quarl</i>	22
Gambar 3.2.	Skema <i>annulus</i>	22
Gambar 3.3.	Skema instalasi penelitian	23
Gambar 3.4.	Distribusi temperatur api difusi <i>annulus jet</i>	25
Gambar 3.5.	Diagram alir penelitian	26
Gambar 4.1.	Hubungan antara tegangan (mV) dengan temperatur (°C)	30
Gambar 4.2.	Grafik kestabilan api difusi <i>annulus jet</i>	31
Gambar 4.3.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>divergent quarl</i> $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	34
Gambar 4.4.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>divergent quarl</i> $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	34
Gambar 4.5.	Visualisasi api <i>lift off</i> pada berbagai variasi sudut <i>divergent quarl</i>	35
Gambar 4.6.	Visualisasi api <i>lift off</i> pada berbagai variasi sudut <i>divergent quarl</i>	35
Gambar 4.7.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi sudut <i>divergent quarl</i> $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	38
Gambar 4.8.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi sudut <i>divergent quarl</i> $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	40



Gambar 4.9. Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial. 42  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

Gambar 4.10. Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial. 45  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Perhitungan massa jenis, $A/F_{\text{stoikiometri}}$ , HHV dan LHV LPG	52
Lampiran 2	Data hasil penelitian dengan tanpa <i>divergent quarl</i>	54
Lampiran 3	Data hasil penelitian dengan <i>divergent quarl</i> 15°	55
Lampiran 4	Data hasil penelitian dengan <i>divergent quarl</i> 30°	56
Lampiran 5	Data hasil penelitian dengan <i>divergent quarl</i> 45°	57
Lampiran 6	Data hasil penelitian dengan <i>divergent quarl</i> 60°	58
Lampiran 7	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan tanpa pemasangan <i>divergent quarl</i> pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	59
Lampiran 8	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan tanpa pemasangan <i>divergent quarl</i> pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	60
Lampiran 9	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 15° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	61
Lampiran 10	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 15° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	62
Lampiran 11	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 30° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	63
Lampiran 12	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 30° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	64
Lampiran 13	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 45° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	65
Lampiran 14	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 45° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	66
Lampiran 15	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 60° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	67



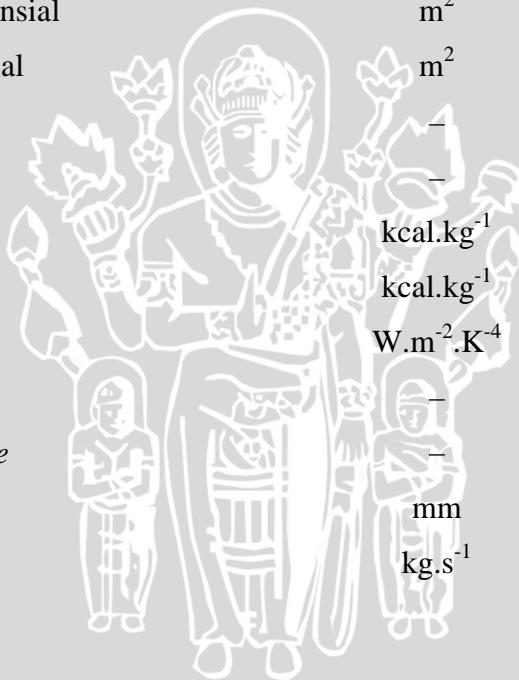
Lampiran 16	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>divergent quarl</i> 60° pada $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan $y = 150$ mm. $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ , $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	68
Lampiran 17	Harga faktor koreksi C untuk orifis udara aksial	69
Lampiran 18	Harga faktor koreksi C untuk orifis udara tangensial	70
Lampiran 19	Harga faktor koreksi C untuk orifis bahan bakar	71



DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
Faktor kelebihan udara	–	$\lambda$
<i>Equivalece ratio</i>	–	$\Phi$
Fluks difusi massa A	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	$m_A''$
Koefisien difusi ( <i>binary diffusivity</i> )	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\mathcal{D}_{AB}$
Gradien fraksi massa	–	$\nabla y_A$
Laju reaksi kimia	$\text{cm}^3.\text{mol}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$k_f$
Energi aktivasi	$\text{cal.mol}^{-1}$	$E_a$
Konstanta gas universal	$\text{cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$R_u$
Suhu Mutlak	K	T
Konstanta	–	A
Bilangan Reynold	–	Re
Laju aliran berputar	$\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$	$G_\phi$
Laju aliran aksial	$\text{kg.m.s}^{-2}$	$G_x$
Massa jenis	$\text{kg.m}^{-3}$	$\rho$
Jari-jari titik <i>r</i> dari sumbu <i>burner</i>	m	<i>r</i>
Jari-jari silinder <i>burner</i>	m	<i>r</i> <sub>0</sub>
Kecepatan aksial di titik <i>r</i>	$\text{m.s}^{-1}$	<i>U</i>
Kecepatan tangensial di titik <i>r</i>	$\text{m.s}^{-1}$	<i>W</i>
<i>Swirl number</i>	–	<i>S</i>
Sudut inklinasi <i>tangential air jet inlets</i>	°	$\theta$
Sudut <i>divergent quarl</i>	°	$\alpha$
Kecepatan aliran bahan bakar	$\text{m.s}^{-1}$	<i>V</i>
Kecepatan aliran udara tangensial	$\text{m.s}^{-1}$	<i>W</i>
Kecepatan aliran udara aksial	$\text{m.s}^{-1}$	<i>U</i>
Luasan <i>annulus</i>	$\text{m}^2$	<i>A</i> <sub>annulus</sub>
Jari-jari lingkaran luar	m	<i>R</i>
Jari-jari lingkaran dalam	m	<i>r</i>
<i>Phi</i>	–	$\pi$
Nilai rata-rata keseluruhan data	–	$\bar{X}$
Jumlah data	–	<i>n</i>

Data ke i	–	$X_i$
Massa jenis bahan bakar	$\text{kg.m}^{-3}$	$\rho_{bb}$
Massa jenis udara	$\text{kg.m}^{-3}$	$\rho_{ud}$
Massa jenis minyak tanah	$\text{kg.m}^{-3}$	$\rho_m$
Massa jenis raksa	$\text{kg.m}^{-3}$	$\rho_{Hg}$
Beda ketinggian pada manometer	mm	$\Delta h$
Percepatan grafitasi bumi	$\text{m.s}^{-2}$	$g$
Rasio diameter orifis dan diameter saluran	–	$\beta$
Diameter saluran bahan bakar	m	$D_{bb}$
Diameter saluran udara aksial	m	$D_{ud}$
Diameter saluran udara tangensial	m	$D_{jet}$
Diameter orifis bahan bakar	m	$d_{bb}$
Diameter orifis udara aksial	m	$d_{ud}$
Diameter orifis udara tangensial	m	$d_{jet}$
Luas saluran bahan bakar	$\text{m}^2$	$A_{bb}$
Luas saluran udara aksial	$\text{m}^2$	$A_{ud}$
Luas orifis saluran jet tangensial	$\text{m}^2$	$A_{udara jet}$
Luas saluran udara tangensial	$\text{m}^2$	$A_{jet}$
Faktor koreksi	–	$C$
<i>Damkohler number</i>	–	$Da$
<i>High Heating Value</i>	$\text{kcal.kg}^{-1}$	HHV
<i>Lower Heating Value</i>	$\text{kcal.kg}^{-1}$	LHV
Konstanta Boltzman	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	$k$
<i>characteristic flow time</i>	–	$\tau_{flow}$
<i>characteristic chemical time</i>	–	$\tau_{chem}$
Panjang <i>divergent quarl</i>	mm	$h$
Massa alir	$\text{kg.s}^{-1}$	$\dot{m}$



## RINGKASAN

**Moch. Habib Subhan**, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2007, **Pengaruh Sudut *Divergent Quarl* pada *Swirl Stabilized Flame* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Api Difusi *Annulus Jet***. Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT. dan Dr. Slamet Wahyudi, ST. MT.

Pembakaran difusi secara luas digunakan pada sistem pembakaran di industri. Salah satu metode yang digunakan adalah menciptakan aliran *swirl* dengan mengalirkan kombinasi antara aliran udara tangensial dan aliran udara aksial. Pada intensitas *swirl* tinggi akan terbentuk aliran resirkulasi, dimana terjadi pencampuran bahan bakar dan udara yang baik. Akan tetapi untuk mencapai intensitas *swirl* yang tinggi dibutuhkan jumlah udara yang besar, akibatnya temperatur nyala api maksimum tidak dapat tercapai karena jumlah *excess air* terlalu besar. Untuk mengatasi hal ini maka aliran *swirl* dialirkan melalui *divergent quarl* pada *burner exit plane*. Metode ini bertujuan untuk memperkuat pengaruh aliran *swirl* pada intensitas *swirl* rendah, sehingga akan diperoleh pembakaran yang lebih sempurna dengan menggunakan jumlah *excess air* yang lebih kecil. Hasilnya adalah kestabilan api menjadi lebih baik serta distribusi temperatur yang lebih merata. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut *divergent quarl* pada *annulus* udara yang paling optimal sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *jet*.

Instalasi penelitian terdiri dari beberapa komponen utama yang meliputi tabung LPG sebagai catu bahan bakar, kompresor sebagai catu aliran udara tangensial, *blower* sebagai catu aliran udara aksial, *burner* sebagai tempat terjadinya reaksi pembakaran dan *annulus* sebagai saluran untuk mengkombinasikan aliran udara aksial dan aliran udara tangensial, serta *divergent quarl* diletakkan pada *burner exit plane*. Variabel bebas yang digunakan adalah tanpa pemasangan *divergent quarl*, sudut *divergent quarl* 15°, 30°, 45° dan 60°, kecepatan aliran udara aksial konstan pada 1,160 [m.s<sup>-1</sup>], kecepatan udara tangensial divariasikan dari 1 ÷ 10 [m.s<sup>-1</sup>] dan kecepatan aliran bahan bakar juga divariasikan antara 1 ÷ 20 [m.s<sup>-1</sup>]. Pengambilan data kestabilan diamati secara langsung, kemudian data terjadinya *lift off* dan *blow off* dicatat dan diplot dalam grafik kestabilan api. Pengambilan data temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouples* yang dikuatkan oleh *Operational Amplifier*, selanjutnya data diubah dari data analog ke data digital dengan menggunakan *Analog to Digital Converter*. Pengukuran temperatur hanya dilakukan pada kecepatan aliran bahan bakar konstan yaitu 7,121 [m.s<sup>-1</sup>].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut *divergent quarl* yang paling optimal yang dipasang pada *annulus* udara mengakibatkan kestabilan nyala api difusi *annulus jet* semakin meningkat dan distribusi temperatur yang semakin merata ke arah horisontal. Daerah kestabilan api difusi terbesar dan distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling baik diperoleh pada pemasangan *divergent quarl* dengan sudut 30°. Dari data temperatur terlihat bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada tengah api.

**Keywords** : pembakaran difusi, *swirl*, *divergent quarl*, kestabilan api.



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, peran pembakaran belum tergantikan oleh proses apapun karena penggunaannya yang sangat luas. Dengan alat yang relatif sederhana, suatu proses pembakaran dapat menghasilkan energi panas yang besar dalam waktu yang sangat singkat. Proses ini berfungsi untuk mengkonversikan energi kimia reaktan menjadi energi kalor yang dapat langsung digunakan atau dikonversikan lagi menjadi energi lain.

Dari segi aerodinamik, pembakaran dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Pada pembakaran *premixed* bahan bakar dan udara bercampur terlebih dahulu sebelum terbakar, sedangkan pada pembakaran difusi bahan bakar dan udara tidak memerlukan proses pencampuran terlebih dahulu sebelum terbakar, sehingga proses pembakaran difusi sangat tergantung pada proses pencampuran bahan bakar dan udara. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian tentang peningkatan laju pencampuran bahan bakar dan udara sehingga akan meningkatkan laju energi pembakaran dan berpengaruh besar terhadap efisiensi pembakaran.

Kestabilan nyala merupakan hal yang penting dalam proses pembakaran difusi. Hal ini dapat terjadi jika bahan bakar dan udara bercampur secara homogen. Salah satu cara *mixing* bahan bakar dan udara agar dapat bercampur secara homogen adalah menciptakan aliran *swirl* pada *burner*. Masri, A. R. (2000), telah melakukan penelitian tentang *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* menghasilkan gradien tekanan yang melawan arah aliran dan menyebabkan lapisan geser pada arah aksial dan tangensial, hal ini mengakibatkan adanya zona resirkulasi yang membawa kembali produk panas hasil pembakaran untuk kembali pada *burner exit plane* yang mengakibatkan nyala api menjadi stabil.

Hizbullah, M. (2007), dalam penelitiannya tentang pengaruh sudut inklinasi *tangential air jet inlets* pada pembakaran difusi menyatakan bahwa semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* menyebabkan terjadinya suatu daerah bertekanan

rendah pada pusat sumbu yang menghasilkan zona resirkulasi. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar disekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran udara aksial dan tangensial, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan gas reaktan. Hal ini mengakibatkan terjadinya peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur yang lebih baik dalam arah horizontal.

Lee, S. (2006), dalam penelitiannya tentang *development of mesoscale burner arrays for gas turbine reheat* yang juga menggunakan *tangential air jet inlets* dengan mengkombinasikan *divergent quarl* pada *annulus* udara sebagai usaha memperbaiki kestabilan api dengan memperbesar zona reaksi bahan bakar dan udara. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh pembesaran penampang menyebabkan pergeseran zona reaksi arah aksial dan radial, hal ini mengakibatkan penurunan kecepatan aliran pada *quarl opening*. Zona reaksi yang semakin luas menyebabkan pembesaran zona resirkulasi yang membawa kembali produk pembakaran pada *quarl opening* sehingga berpengaruh besar terhadap jumlah gas yang bersirkulasi.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, maka perlu dilakukan suatu penelitian mengenai pengaruh variasi sudut *divergent quarl* pada *annulus* udara sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *jet*. Pemasangan *divergent quarl* ini dimaksudkan untuk memperbesar efek resirkulasi pada aliran *swirl*, sehingga campuran bahan bakar dan udara semakin homogen dan mengakibatkan proses pembakaran menjadi lebih baik. Selain itu, dengan penambahan massa alir udara dan massa alir bahan bakar dapat diteliti lebih lanjut mengenai kestabilan nyala dan distribusi temperatur serta dapat juga diketahui gambaran fenomena yang terjadi pada api difusi *jet* dengan menggunakan *divergent quarl*.

### 1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas maka permasalahan yang akan diteliti adalah:

Bagaimana pengaruh sudut *divergent quarl* pada *swirl stabilized flame* terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*?

### 1.3. Batasan Masalah

Untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian, karena luasnya objek kajian, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Bahan bakar yang digunakan adalah *Liquified Petroleum Gas* (LPG) produksi Pertamina.
2. Aliran udara dan bahan bakar, serta kerugian panas yang terjadi selama proses pembakaran dianggap *steady state*.
3. Kondisi lingkungan dianggap memiliki kelembaban dan temperatur konstan.
4. Jumlah sensor yang digunakan untuk mengukur temperatur adalah 3 buah.

#### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sudut *divergent quarl* pada *swirl stabilized flame* yang paling optimal sebagai upaya peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Mampu menerapkan teori-teori yang telah didapat selama perkuliahan terutama mengenai teori pembakaran.
2. Memberikan kontribusi terhadap dunia industri yang berhubungan dengan aerodinamika pembakaran pada pembakaran difusi.
3. Menghemat penggunaan sumber energi bahan bakar fosil dengan pembakaran yang lebih sempurna.
4. Dapat meningkatkan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi terutama tentang teknologi pembakaran dengan pemasangan *divergent quarl* pada pembakaran difusi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi oksidasi antara bahan bakar dan oksigen dari udara sebagai oksidator dengan bantuan energi dari luar (energi aktivasi) sehingga menghasilkan cahaya dan kalor (Turns, 1996: 6).

Pembakaran terjadi melalui serangkaian reaksi yang cepat dan berkelanjutan yang dikenal sebagai reaksi rantai (*chain reaction*). Reaksi rantai diawali dengan proses pencampuran reaktan, pada kondisi ini reaksi belum dapat berlangsung sampai pada suatu kondisi dimana tingkat energi di lingkungan mencukupi, sehingga perlu ditambahkan energi dari luar (energi aktivasi). Energi aktivasi berfungsi sebagai pemutus ikatan senyawa hidrokarbon menjadi radikal bebas yang merupakan ion atau atom tidak stabil. Ion-ion akan bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat sebagai produk pembakaran dan kelebihan-kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.

Pembakaran ideal atau pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dengan menggunakan jumlah udara minimum atau udara teoritis yang menghasilkan produk pembakaran secara sempurna, dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon adalah  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{N}_2$  sebagai *inert gas*. Pembahasan akan dibatasi pada proses pembakaran antara bahan bakar hidrokarbon dan udara.

Tabel 2.1. Komposisi udara kering

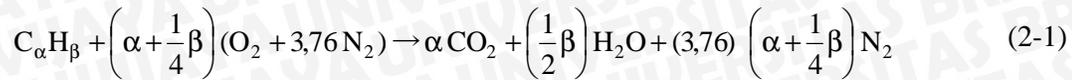
Unsur / senyawa	Persentase volume ( % )	Persentase berat ( % )	Berat molekul Lb per mole
Oksigen ( $\text{O}_2$ )	20,99	23,19	32,00
Nitrogen ( $\text{N}_2$ )	78,03	75,47	28,016
Argon ( Ar )	0,94	1,30	39,944
Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )	0,03	0,04	44,003
Hidrogen ( $\text{H}_2$ )	0,01	0,00	2,016
Udara kering	100,00	100,00	28,967

Sumber: Tjokroawidjojo, 1986: 47

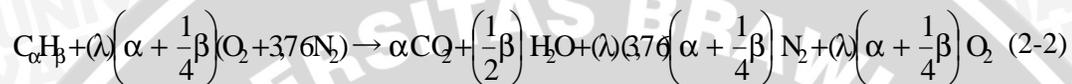
Untuk perhitungan dalam reaksi pembakaran, udara dianggap terdiri dari 21% volume  $\text{O}_2$  dan 79% volume  $\text{N}_2$ , sehingga untuk penggunaan 1 mol  $\text{O}_2$  akan melibatkan

$$\text{penggunaan} \left( \frac{79,0}{21,0} \right) = 3,76 \text{ mol } \text{N}_2.$$

Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar ( $C_\alpha H_\beta$ ) dan udara dengan menggunakan jumlah udara teoritis dituliskan sebagai berikut (Borman, 1998: 67):



Aktualnya, pembakaran sempurna dengan menggunakan jumlah udara teoritis sulit dilakukan, sehingga perlu ditambahkan sejumlah udara pembakaran lagi agar semua bahan bakar dapat bereaksi sempurna dengan udara. Tambahan udara pembakaran ini disebut sebagai udara berlebih (*excess air*). Reaksi pembakaran bahan bakar ( $C_\alpha H_\beta$ ) dengan menggunakan udara berlebih dituliskan sebagai berikut:



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:

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

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

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

dengan :  $\Phi = 1$ , apabila campuran stoikiometri

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

$0 < \Phi < 1$ , apabila campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixtures*)

Untuk mengusahakan terjadinya pembakaran sempurna, ada lima syarat yang harus dipenuhi sesuai dengan aturan *MATTP* (Culp, 1996: 108), yaitu:

1. *M*, *mixing* atau pencampuran bahan bakar dan udara yang baik.
2. *A*, *air* atau udara pembakaran yang cukup.
3. *T*, *time* atau waktu harus mencukupi untuk proses reaksi.

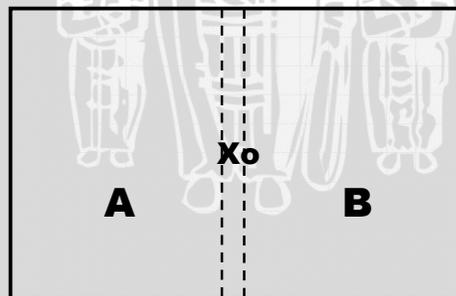
4.  $T$ , *temperature* atau suhu pembakaran yang cukup tinggi.
5.  $\rho$ , *density* atau massa jenis yang cukup untuk proses difusi.

Salah satu keuntungan dari proses pembakaran adalah dapat memperoleh energi yang cepat dengan adanya reaksi kimia pembakaran yang berlangsung sangat cepat. Dalam pembakaran difusi, laju energi pembakaran yang dilepas tergantung dari proses pencampuran bahan bakar dan udara, sedangkan campuran yang homogen berpengaruh besar terhadap kecepatan reaksi pembakaran. Oleh karena itu peningkatan kecepatan reaksi merupakan faktor penting di dalam proses pembakaran. Hal-hal yang dilakukan untuk meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran adalah:

- a. Meningkatkan intensitas turbulensi untuk proses pencampuran reaktan.
- b. Memperluas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara.
- c. Meningkatkan temperatur pembakaran (pemanasan awal).

## 2.2. Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi adalah pembakaran yang tidak memerlukan proses pencampuran bahan bakar dan udara secara mekanik sebelum terjadi proses pembakaran. Pembakaran difusi akan berlangsung bila pencampuran udara dan bahan bakar melalui proses difusi massa mencapai kondisi mendekati stoikiometri dan panas yang dilepas oleh api di daerah pencampuran tersebut sudah cukup. Pembakaran difusi tersebut dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api korek api, pembakaran di turbin gas dan lain sebagainya.



Gambar 2.1: Difusi komponen A ke dalam komponen B  
Sumber: Holman, 1991: 533

Misalkan terdapat ruangan tertutup yang disekat oleh bidang khayal  $X_0$  (Gambar 2.1). 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 acak ke dua arah, demikian pula partikel gas B, sehingga dalam ruangan tercapai

keseimbangan konsentrasi gas A dan gas B. Hukum *Fick* tentang difusi menyatakan bahwa fluks difusi massa dari suatu konstituen tergantung dari gradien fraksi massa. Hal tersebut dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$\dot{m}_A'' = -\rho \mathcal{D}_{AB} \nabla y_A \quad (\text{Borman, 1998: 595}) \quad (2-5)$$

dengan:  $\dot{m}_A''$  = flux difusi massa A ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

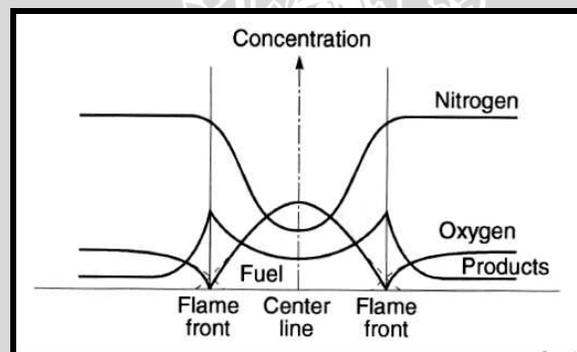
$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\mathcal{D}_{AB}$  = koefisien difusi (*binary diffusivity*) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\nabla y_A$  = gradien fraksi massa

$$= \left( \frac{\partial y_A}{\partial x} + \frac{\partial y_A}{\partial y} + \frac{\partial y_A}{\partial z} \right)$$

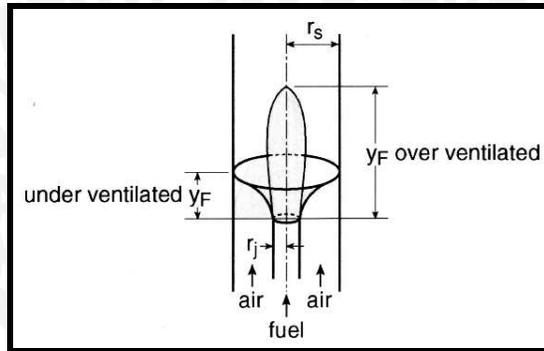
Sama seperti pada persamaan aliran energi, tanda minus menyatakan bahwa partikel mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.



Gambar 2.2: Konsentrasi spesies pada pembakaran difusi  
Sumber: Nordin, 2003: 4

Proses pembakaran difusi seperti terlihat pada gambar 2.2 menunjukkan bahwa jumlah bahan bakar dan oksigen yang mampu menembus batas nyala api adalah sangat kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa reaksi kimia diselesaikan pada daerah batas atau daerah permukaan api, dimana diperkirakan sebagai permukaan adalah bahan bakar dan udara yang masuk dalam proporsi stoikiometri.

Sebuah model pembakaran yang umum digunakan untuk menganalisis nyala api difusi pertama kali diperkenalkan oleh Burke dan Schumann pada tahun 1979 (Kuo, 1986: 348). Model tersebut adalah sistem pembakaran dimana bahan bakar dan udara mengalir sejajar dalam tabung pembakaran silinder koaksial.

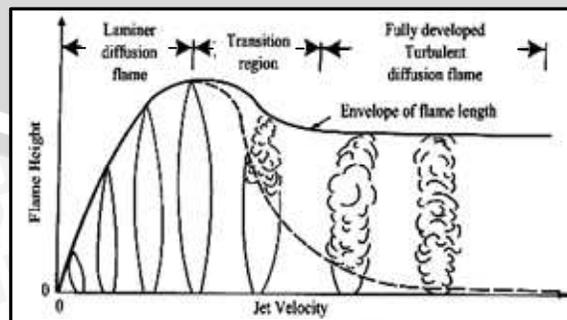


Gambar 2.3: Bentuk api difusi  
 Sumber: Nordin, 2003: 5

Model Burke dan Schumann (Gambar 2.3) dapat digunakan untuk menganalisis bentuk nyala api difusi sehingga dengan model tersebut dapat diklasifikasikan kedalam dua bentuk yaitu:

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

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 2.4: Perubahan aliran dan struktur api  
 Sumber: Kuo, 1986: 359

Gambar 2.4 menjelaskan tentang perubahan aliran api difusi *jet* laminar ke api difusi *jet* turbulen. Perubahan aliran api tersebut disebabkan oleh peningkatan kecepatan aliran (*jet*) bahan bakar. Pada kecepatan *jet* bahan bakar yang rendah struktur api adalah laminar. Panjang api laminar tersebut akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakar sampai pada suatu batas aliran api menjadi turbulen. Pada kondisi transisi terjadi perubahan dari aliran laminar menjadi turbulen. Panjang api laminar akan mengalami penurunan dan panjang api turbulen akan mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakar, kemudian panjang api total akan menurun karena kecepatan pengadukan api yang turbulen.

### 2.3. Penyalaan

Penyalaan adalah 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.

Sebagaimana proses lainnya, penyalaan 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 masih belum cukup untuk menimbulkan penyalaan. Karena itu diperlukan tambahan energi dari luar, tambahan energi tersebut disebut energi aktivasi. Energi aktivasi ini dapat berupa rangsangan termal, rangsangan kimia, serta rangsangan mekanik dan dalam penelitian ini akan dibatasi terhadap proses penyalaan termal.

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.

2. Waktu (*time*)

Waktu harus cukup lama agar panas dapat diserap oleh reaktan sehingga proses termokimia dapat terjadi.

3. Turbulensi (*turbulence*)

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

Menurut teori, laju reaksi kimia tidak sama dengan nol untuk suhu berapapun sesuai dengan persamaan Arrhenius (Kuo, 1986: 737) berikut ini:

$$kf = A \exp \left[ -\frac{Ea}{Ru \cdot T} \right] \quad (2-6)$$

dengan :  $kf$  = laju reaksi kimia ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$Ea$  = energi aktivasi ( $\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$Ru$  = konstanta gas universal ( $\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

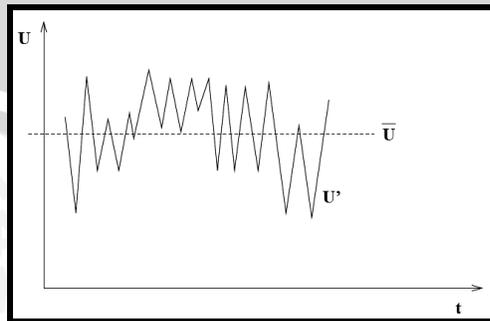
$T$  = suhu mutlak (K)

$A$  = konstanta

#### 2.4. Intensitas Turbulensi Aliran

Dalam suatu aliran fluida, semakin besar intensitas turbulensi akan mengakibatkan partikel-partikel (massa-massa molar yang kecil) fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang semakin tidak teratur, yang mengakibatkan pertukaran momentum dari suatu bagian fluida ke bagian yang lainnya dengan cara yang menyerupai perpindahan molekuler. Teori tentang aliran ini sangat sulit namun analisa secara data eksperimen dapat digunakan sebagai acuan tentang turbulensi.

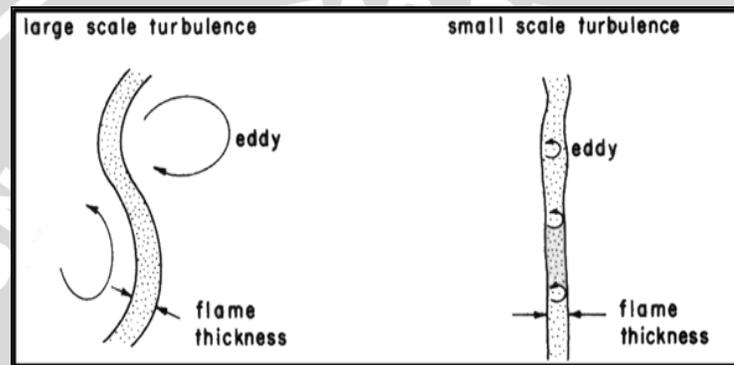
Kecepatan makroskopik fluida pada sistem turbulen yang terukur pada anemometer kawat panas dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5: Fluktuasi kecepatan rata-rata  
Sumber: Nordin, 2003: 29

Dari Gambar 2.5 dapat dijelaskan bahwa pada aliran dengan intensitas turbulensi yang besar, 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 intensitas turbulensi pada suatu aliran disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

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



Gambar 2.6: Efek *scale of turbulence* pada permukaan nyala  
Sumber: Kuo, 1986: 418

Gambar 2.6 menunjukkan akibat dari aliran turbulen, aliran fluida akan terbagi menjadi skala (*scale*) yang lebih kecil, sehingga akan berpengaruh terhadap struktur permukaan nyala. 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 laminar (*laminar flame front thickness*). *Small eddies* mengakibatkan terjadinya dissipasi energi kinetik fluida menjadi energi dalam (*internal energy*) dan gesekan fluida yang dihasilkan mengakibatkan peningkatan temperatur pembakaran (efek pemanasan awal). Akibat 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 akan merubah permukaan nyala laminar yang *smooth* menjadi bentuk lipatan-lipatan pada permukaan nyala. 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.

Dalam pembakaran difusi, laju energi pembakaran yang dilepas tergantung dari proses pencampuran bahan bakar dan udara, sehingga untuk mengetahui karakteristik proses pembakaran diperlukan sebuah parameter yang dinyatakan dengan *Damköhler number*, yaitu perbandingan antara *characteristic flow time* dan *characteristic chemical time*, seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}} \quad (\text{Turn, 1996: 389}) \quad (2-7)$$

dengan:  $Da$  = Damköhler number

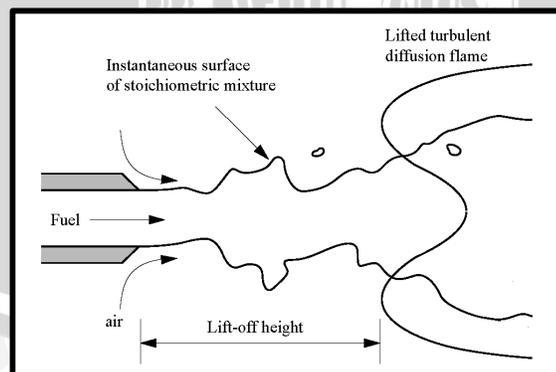
$\tau_{flow}$  = characteristic flow time

$\tau_{chem}$  = characteristic chemical time

Jika laju reaksi kimia reaktan lebih cepat dari pada laju aliran reaktan, maka  $Da \gg 1$ , sebaliknya jika laju aliran reaktan lebih cepat daripada laju reaksi kimia reaktan, maka  $Da \ll 1$ , karena laju berbanding terbalik dengan waktu.

## 2.5. 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.



Gambar 2.7: Skema *lift off* pada api difusi *jet*  
Sumber: Peters, 1997: 95

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

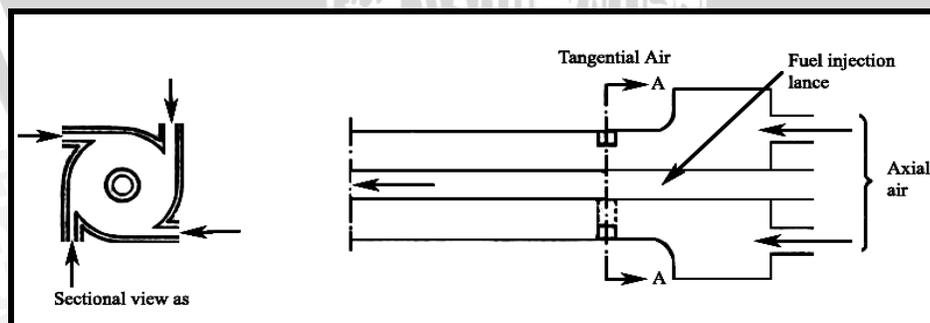
tergantung pada konfigurasi alirannya. Pada aliran *jet* bahan bakar berkecepatan rendah, kondisi api adalah laminar, kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada pada kondisi turbulen.

Kondisi *lift off* didefinisikan sebagai suatu kondisi dimana saat api mulai tidak menempel pada mulut nosel (Gambar 2.7). Hal ini terjadi karena kecepatan api lebih kecil dari kecepatan gas reaktan, sehingga api akan bergerak menjauhi mulut nosel.

Panjang *lift off* adalah jarak antara mulut nosel dan pangkal api. Panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan *jet* bahan bakar sampai api mengalami *blow off* (kondisi api padam setelah mengalami *lift off*). *Blow off* terjadi bila api difusi telah melewati batas kritis *lift off*. *Flame stretch* atau pemanjangan api akibat efek *blow off* terjadi jika gradien kecepatan dalam aliran terlalu besar yang mengakibatkan hilangnya panas dan laju reaksi yang menurun. Baik *lift off* maupun *blow off* merupakan kondisi yang harus dihindari dalam proses pembakaran.

## 2.6. Pembakaran dengan Menggunakan Udara Berputar pada *Divergent Quarl*

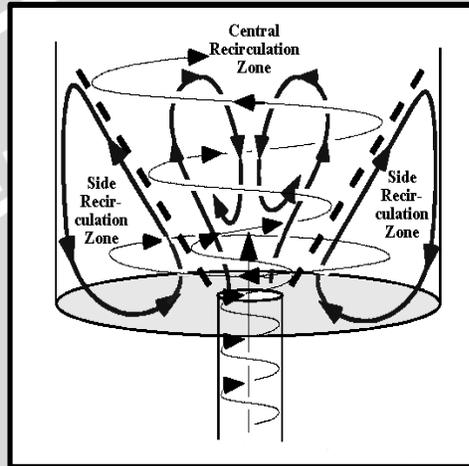
Prinsip pembakaran dengan menggunakan udara berputar pada *burner outlet* adalah menciptakan daerah bertekanan rendah pada *downstream* sepanjang sumbu *burner*. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar disekitar sumbu dalam kombinasi antara aliran udara aksial dan tangensial. Aliran berputar akan mengembang dan udara pembakaran akan terkumpul pada batas lingkaran akibat gaya sentrifugal. (Monnot, 1985: 91).



Gambar 2.8: Diagram *burner* dengan menggunakan udara berputar  
Sumber: Monnot, 1985: 92

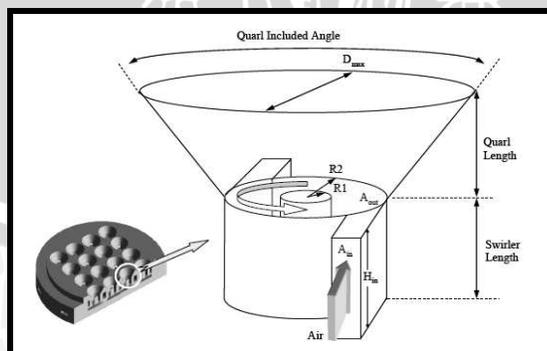
Kombinasi antara aliran udara aksial dan tangensial seperti ditunjukkan pada gambar 2.8 akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl*. Gambar 2.9 menunjukkan adanya zona resirkulasi yang ditimbulkan oleh aliran *swirl*. Aliran *swirl* mengakibatkan perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang menyebabkan adanya lapisan geser

(*shear layer*) antara aliran resirkulasi dan daerah utama, dimana pada permukaan geser tersebut terjadi perpindahan panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar dan udara), sehingga reaktan akan mengalami pemanasan awal. 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.



Gambar 2.9: Zona resirkulasi akibat aliran *swirl*  
 Sumber: Hedman, 2002: 3

*Divergent quarl* (Gambar 2.10) merupakan saluran dengan luasan yang membesar yang diletakan pada *burner outlet*. Aliran udara berputar yang melewati *divergent quarl* akan mengalami penurunan kecepatan sehingga akan meningkatkan proses pencampuran bahan bakar dan udara. Luasan zona reaksi yang semakin besar menimbulkan peningkatan aliran resirkulasi, akibatnya proses pembakaran akan menjadi semakin baik.



Gambar 2.10: Skema desain *divergent quarl*  
 Sumber: Lee, 2006: 45

Aliran *swirl* yang melalui *divergent quarl* mengakibatkan terjadinya penurunan kecepatan dan meningkatkan proses pencampuran reaktan yang lebih baik, sehingga reaktan memiliki cukup waktu untuk bercampur serta homogenitas campuran menjadi lebih baik, akibatnya kestabilan api akan meningkat. Zona resirkulasi yang terjadi akibat aliran *swirl* akan membawa kembali produk pembakaran pada *quarl opening*, sehingga akan menyempurnakan proses pembakaran produk yang belum terbakar.

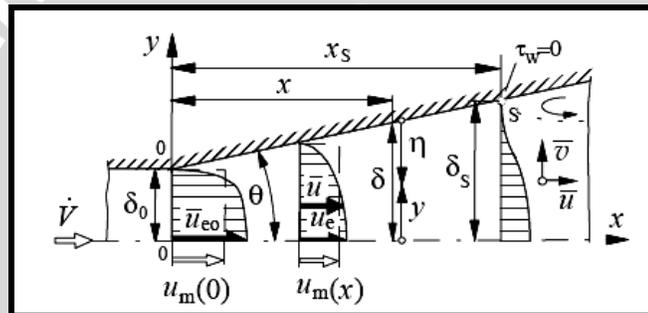
Sebagai perbandingan adalah *conventional high swirl burner*, dimana sejumlah udara yang besar digunakan dalam proses pembakaran, hal ini menyebabkan tidak tercapainya temperatur nyala maksimum karena jumlah udara berlebih (*excess air*) yang digunakan terlalu banyak. Dengan konsep yang mirip dengan *conventional high swirl burner*, yaitu menggunakan *air jet* untuk membangkitkan aliran *swirl*, terdapat permasalahan pada intensitas *swirl* yang rendah, aliran tidak cukup kuat untuk menciptakan pemecahan *vortex* (*vortex breakdown*) yang menyebabkan zona resirkulasi. Untuk mengatasi hal ini maka aliran udara berputar dilewatkan pada suatu dinding dengan luasan yang membesar (*divergent quarl*) saat keluar dari *burner exit plane*. Pada saat melewati *divergent quarl*, aliran mengalami penurunan kecepatan sehingga tercapai suatu kondisi dimana kecepatan lokal sama dengan kecepatan rambatan api yang mengakibatkan nyala berkembang dari sisi muara sehingga api menjadi stabil, seperti dikatakan oleh Cheng, et al. (2001). Keuntungan lain dari penggunaan *divergent quarl* adalah mengurangi resiko terjadinya *flash back*, karena kecepatan aliran pada *throat* lebih besar dari pada kecepatan rambatan api. Lawn, C. J. menyatakan bahwa semakin besar sudut *divergent quarl* maka akan mengakibatkan terciptanya zona tekanan rendah antara *burner jet* dan *quarl opening* sehingga api cenderung semakin memendek dan melebar (Vanoverberghe, 2004: 37).

Semakin besar sudut *divergent quarl* maka akan tercipta zona reaksi yang semakin luas. Hal ini mengakibatkan tersedianya ruang yang cukup untuk melakukan pencampuran, sehingga homogenitas campuran akan meningkat. Lee, S. (2006) menyatakan bahwa aliran yang melewati *divergent quarl* akan mengalami pergeseran zona resirkulasi yang semakin luas, akibatnya gas yang bersirkulasi semakin banyak, sehingga terjadi peningkatan proses pemanasan awal pada reaktan. Hasilnya adalah pembakaran yang terjadi semakin mendekati sempurna dan distribusi temperatur api menjadi lebih baik.

Aliran yang melalui *divergent quarl* akan mengalami perubahan struktur aliran, hal ini tergantung pada geometri *divergent quarl* dan angka *reynolds*. Pada *divergent*

*quarl* (Gambar 2.10) aliran akan mengalami penurunan kecepatan akibat perubahan luasan penampang. Tujuannya adalah untuk mendapatkan *heat recovery* dan *pressure recovery* yang optimal pada *quarl opening*. Akan tetapi pada suatu kondisi tertentu terjadi suatu fenomena yang disebut aliran separasi (*separation flow*), kondisi ini terjadi jika tegangan geser pada dinding sama dengan nol. Aliran separasi sebisa mungkin harus dihindari karena akan menyebabkan turunnya *heat recovery* dan *pressure recovery* maksimum dan merubah pola aliran akibat adanya gradien tekanan pada zona aliran utama dan zona aliran separasi.

Gambar 2.11 menjelaskan tentang profil kecepatan aliran yang melewati *divergent quarl*. Akibat adanya pembesaran penampang dan gaya geser pada dinding menyebabkan kecepatan  $v$  pada  $x = x_s$  sama dengan nol, hal ini yang menyebabkan terjadinya aliran separasi (*separation flow*).



Gambar 2.11: Profil kecepatan aliran melalui *divergent quarl*

Sumber: Vujicic, 2003: 2

Vanoverberghe, K. (2004) dalam penelitiannya menggunakan sudut *divergent quarl*  $20^\circ$  dengan pertimbangan keseimbangan antara gaya sentrifugal akibat aliran udara tangensial dan tekanan yang rendah pada *internal recirculation zone*. Ekspansi aliran di dalam *divergent quarl* mengakibatkan turunnya kecepatan tangensial karena terdissipasi menjadi momentum, serta proses pencampuran dengan resirkulasi produk pembakaran terjadi pada kecepatan tangensial rendah. Lee, S. (2006) menggunakan sudut *divergent quarl*  $60^\circ$  dengan pertimbangan pemakaian mekanisme kestabilan *bluff body* serta meminimalkan faktor gesekan fluida dengan dinding *divergent quarl*. Chedaille, et al. (1966) menyatakan bahwa sudut *divergent quarl* yang optimum adalah  $35^\circ$  dengan panjang  $1-2 d$ , dimana  $d$  adalah diameter *jet* (Lee, 2006: 30).

Dengan variasi sudut *divergent quarl* maka diharapkan akan didapatkan sudut *divergent quarl* yang paling optimal yang akan menghasilkan pergeseran zona reaksi yang semakin luas. Pergeseran zona reaksi ini akan mengakibatkan bertambahnya radikal bebas yang merupakan atom tidak stabil, dimana radikal bebas tersebut

bertindak sebagai agen yang menyebabkan molekul lain yang masih stabil menjadi tidak stabil. 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.

## 2.7. Distribusi Kecepatan dan Tekanan pada Aliran Berputar

Aliran berputar dicirikan dengan perbandingan laju aliran berputar ( $G_\phi$ ) dengan laju aliran aksial ( $G_x$ ) seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$S = \frac{G_\phi}{r G_x} \quad (\text{Monnot, 1985: 93}) \quad (2-8)$$

laju aliran berputar ( $G_\phi$ ) dirumuskan :

$$G_\phi = \int_0^{r_0} 2\pi\rho U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1985: 93}) \quad (2-9)$$

laju aliran aksial ( $G_x$ ) dirumuskan :

$$G_x = \int_0^{r_0} 2\pi\rho U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1985: 93}) \quad (2-10)$$

dengan :

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

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

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

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

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

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

$\frac{\partial p}{\partial x}$  = gradien tekanan pada saluran

Intensitas pembakaran untuk aliran yang bersirkulasi dipengaruhi oleh derajat *swirl* aliran. Derajat *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 kearah 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.

## 2.8. LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

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. 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 *Mix* produksi Pertamina dengan komposisi 70 % volume propana dan 30% volume butana.

## 2.9. Hipotesis

Penggunaan sudut *divergent quarl* yang optimal pada aliran udara berputar akan menyebabkan pembesaran zona reaksi pembakaran, sehingga terjadi peningkatan zona resirkulasi yang mengakibatkan semakin banyak jumlah produk pembakaran yang bersirkulasi. Hasil ini mengakibatkan terjadinya peningkatan proses pemanasan awal terhadap reaktan sehingga energi kinetik reaktan akan meningkat, kemudian reaktan menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan. Akibatnya proses difusi menjadi lebih baik dan campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen, hal ini akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, akibatnya kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *jet* akan meningkat.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental (*true experimental research*), yaitu melakukan pengamatan langsung untuk mengetahui hubungan sebab akibat dengan menggunakan satu atau lebih kelompok perlakuan dan membandingkan hasilnya dengan satu atau lebih kontrol yang digunakan sebagai pembanding.

### 3.2. Variabel yang Diukur

Ada tiga buah variabel yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

#### 1. Variabel bebas

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

- Sudut *divergent quarl* ( $\alpha$ ) : tanpa, 15°, 30°, 45°, 60°
- Kecepatan aliran bahan bakar (V) : 1 m.s<sup>-1</sup> ÷ 20 m.s<sup>-1</sup>
- Kecepatan aliran udara tangensial (W) : 1 m.s<sup>-1</sup> ÷ 10 m.s<sup>-1</sup>

#### 2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*.

#### 3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang besarnya tetap dan ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Adapun variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah :

- Sudut inklinasi *tangential air jet inlets* ( $\theta$ ) : 60°
- Panjang *divergent quarl* (h) : 20 mm
- Kecepatan aliran udara aksial (U) : 1,160 m.s<sup>-1</sup>
- Diameter pipa bahan bakar : 2 mm
- Diameter *tangential air jet inlets* : 3 mm

### 3.3. Alat-alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

#### 1. *Blower*

*Blower* digunakan untuk mensuplai udara pembakaran pada arah aksial. *Blower* yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

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

#### 2. *Stop valve*

Digunakan untuk mengatur massa alir bahan bakar dan udara yang akan digunakan.

#### 3. Orifis

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

#### 4. Pipa udara

Berfungsi sebagai saluran udara pembakaran yang dihasilkan dari *blower* dan *compressor*. Pipa udara yang digunakan untuk aliran udara aksial berdiameter 60 mm dan untuk aliran udara tangensial berdiameter 3 mm.

#### 5. *Manometer*

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

#### 6. Tabung gas

Tabung gas digunakan untuk menampung bahan bakar gas LPG.

#### 7. Pipa bahan bakar

Berfungsi untuk mensuplai bahan bakar ke ruang bakar. Pipa bahan bakar yang digunakan berdiameter 2 mm.

#### 8. Ruang bakar

Ruang bakar yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk balok dengan ukuran 25 cm x 25 cm x 100 cm. Di dalam ruang bakar terjadi proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar.

#### 9. Kaca pengamatan

Digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap api difusi yang terjadi selama penelitian berlangsung. Kaca pengamatan tersebut berukuran 16 cm x 56 cm.

#### 10. 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*

#### 11. Kompresor

Kompresor digunakan untuk mensuplai udara pembakaran pada arah tangensial.

Kompresor yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. *Model* : *C-FC1-24 HP 0,5 LAKONI 125X*
- b. *Tegangan* : *220 V*
- c. *Tekanan* : *240 PSI*

#### 12. *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.

#### 13. Perangkat sensor

Perangkat sensor terdiri dari:

- a. *Operational Amplifier*

Digunakan untuk menguatkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor.

- b. *ADC (Analog to Digital Converter)*

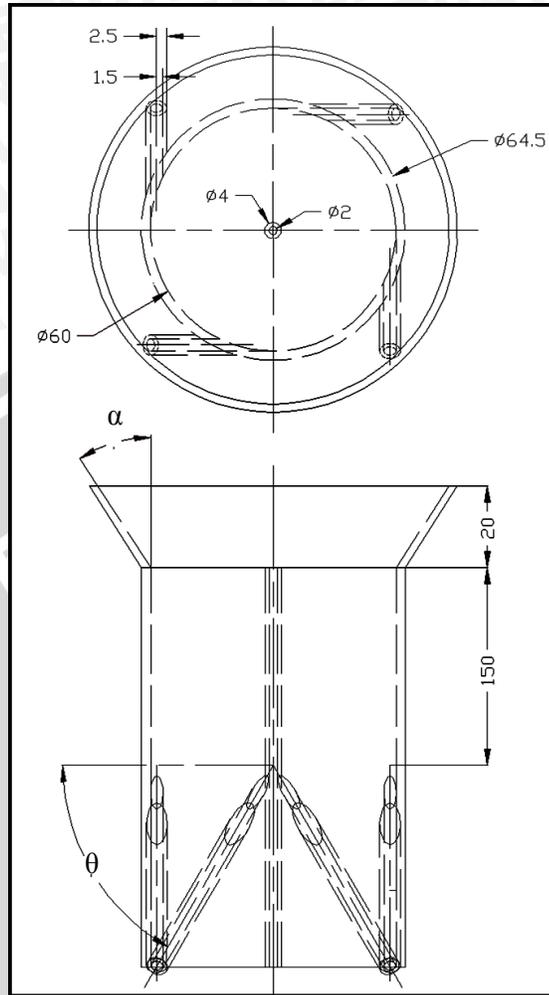
ADC berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan analog dari sensor menjadi sinyal digital agar dapat di baca oleh komputer. Bahasa program yang digunakan adalah Borland Delphi 6.

#### 14. Komputer

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

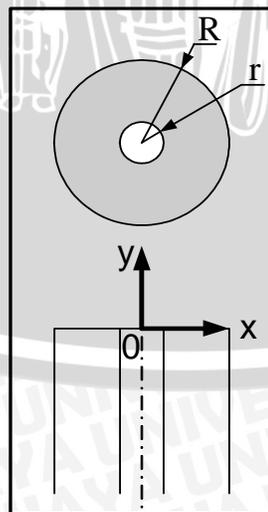
#### 15. *Divergent quarl*

*Divergent quarl* merupakan saluran dengan luasan yang membesar yang diletakan pada *burner outlet*. Sedangkan *tangential air jet inlets* adalah suatu alat yang digunakan untuk mensuplai aliran udara secara tangensial dengan sudut inklinasi tertentu dan diharapkan menghasilkan aliran berputar yang dihasilkan oleh kompresor.



Gambar 3.1 Variasi sudut *divergent quarl*

Dengan variasi sudut *divergent quarl*  $\alpha_1 = 15^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 60^\circ$ , dan tanpa pemasangan *divergent quarl* sebagai pembanding.



Gambar 3.2 : Skema *annulus*

Sumber: <http://planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html>

Luas *annulus* dituliskan seperti berikut:

$$A_{\text{annulus}} = \pi(R^2 - r^2) \quad (\text{www.planetmath.org}) \quad (3 - 1)$$

dengan: R = jari-jari lingkaran luar (m)

r = jari-jari lingkaran dalam (m)

*Tangential air jet inlets* diletakkan pada *annulus* udara. *Annulus* adalah suatu ruang bebas yang terletak antara dua lingkaran yang mempunyai titik pusat yang sama.

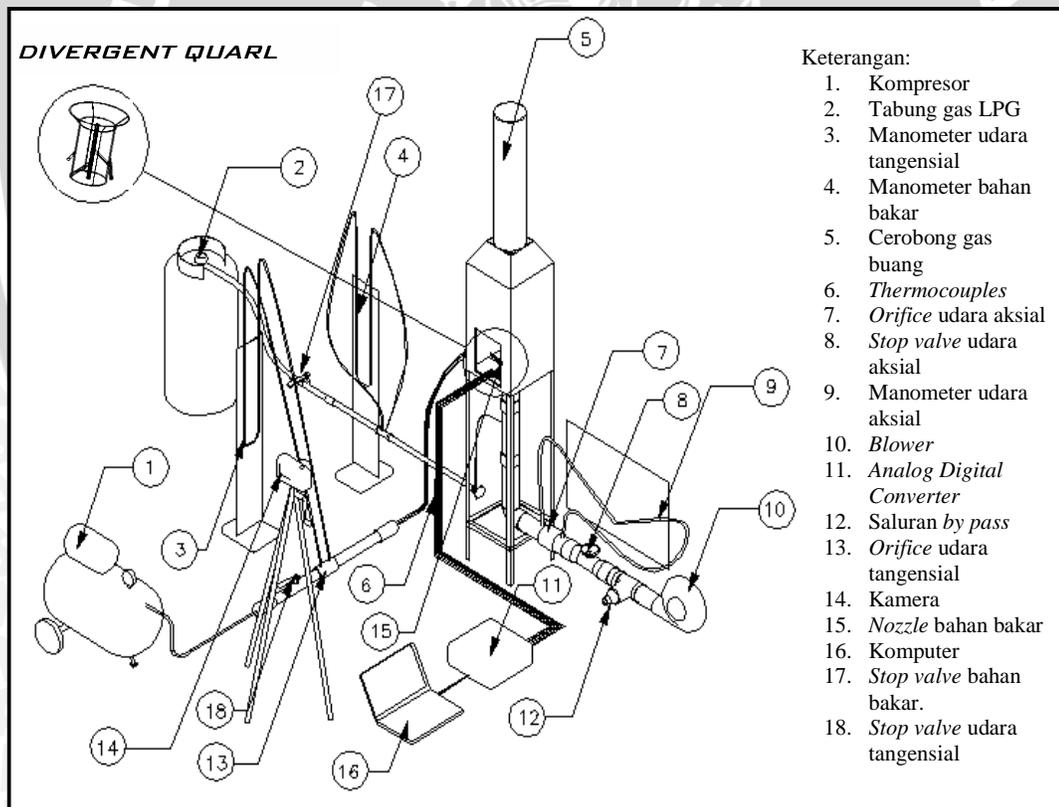
Gambar 3.2 menjelaskan tentang skema *annulus*, luasan yang diarsir adalah luasan *annulus*.

15. Cerobong

Cerobong merupakan saluran keluar asap hasil proses pembakaran.

3.4. Instalasi Penelitian

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



Gambar 3.3. Skema instalasi penelitian

### 3.5. Metode Pengambilan Data

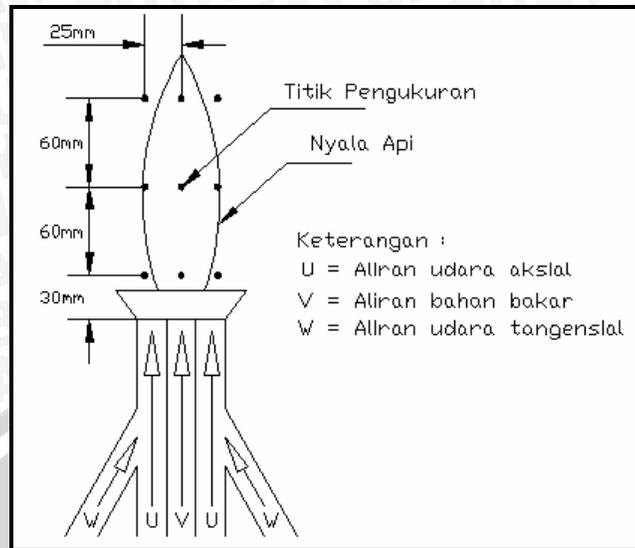
Untuk mendapatkan data penelitian yang diinginkan, maka langkah-langkah yang dilakukan adalah:

a) Untuk mengetahui kestabilan api difusi:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengatur *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan aliran  $1,160 \text{ ms}^{-1}$ .
3. Mengatur kecepatan aliran udara *tangential* pada *annulus* udara.
4. Membuka *stop valve* bahan bakar pada kecepatan aliran tertentu.
5. Menyalakan api pada saat kondisi tersebut.
6. Memperbesar aliran bahan bakar (massa alir udara adalah konstan) sampai terjadi *lift off* dan dilanjutkan sampai api menjadi *blow off*, kemudian data kecepatan aliran bahan bakar pada saat *lift off* dan *blow off* dicatat.
7. Mengambil gambar nyala api difusi *annulus jet* pada kondisi tertentu untuk mengetahui fenomena yang terjadi dengan bantuan kamera digital.
8. Memperbesar aliran udara tangensial dan melakukan langkah 2 sampai 7.
9. Melakukan langkah 2 sampai 8 dengan sudut *divergent quarl* yang berbeda.

b) Untuk mengetahui fluktuasi temperatur:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengatur *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan aliran  $1,160 \text{ ms}^{-1}$ .
3. Mengatur kecepatan aliran udara *tangential* pada *annulus* udara.
4. Membuka *stop valve* bahan bakar pada kecepatan aliran tertentu.
5. Menyalakan api pada saat kondisi tersebut.
6. Mengambil data temperatur api difusi *annulus jet* dengan menggunakan *thermocouples* dan perangkat komputer. Pengambilan data temperatur dilakukan selama 100 detik dan diperoleh sebanyak 300 data.
7. Memperbesar aliran udara tangensial dan melakukan langkah 2 sampai 6.
8. Mematikan api dan melakukan langkah 2 sampai 7 dengan sudut *divergent quarl* yang berbeda.



Gambar 3.4 Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

### 3.6. Rancangan Pengolahan Data Perhitungan nilai rata-rata

Setiap pengukuran diambil nilai rata-ratanya dengan menggunakan persamaan berikut:

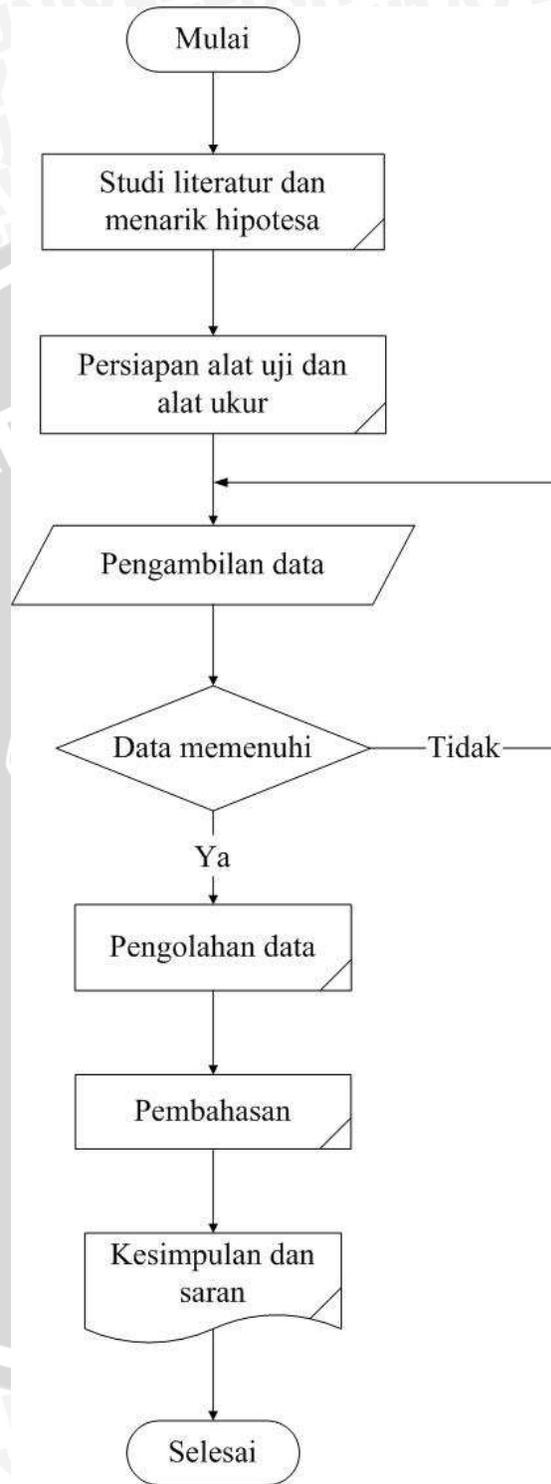
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n}$$

(Wahyudi S, 2006: 8) (3 – 2)

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

Nilai rata-rata tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kecenderungan tingkat kestabilan dan distribusi temperatur dari masing-masing data yang telah didapatkan dari hasil pengambilan, kemudian data tersebut ditampilkan ke dalam grafik kestabilan nyala dan grafik distribusi temperatur.

3.7. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

## BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Penelitian

Setelah pengambilan data dilakukan, diperoleh data dari masing-masing variasi penelitian, yaitu berupa kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer melalui *orifice* udara baik itu udara aksial maupun tangensial, serta kecepatan aliran bahan bakar yang 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*. Data temperatur diukur dengan menggunakan *thermocouples* yang dihubungkan dengan *operational amplifier* dan *analog to digital converter* dengan bantuan komputer. Data kecepatan aliran udara tangensial dan bahan bakar diplot dalam grafik kestabilan api (pada sumbu  $x - y$ ), sedangkan dari data temperatur ditentukan nilai temperatur rata-rata dan diplot dalam grafik distribusi temperatur. Pada tiap titik pengamatan diperoleh data fluktuasi temperatur.

#### 4.1.1. Kestabilan nyala api difusi *annulus jet*

##### 4.1.1.1. Data penelitian

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali, sehingga bisa mewakili keragaman data yang diperoleh dari penelitian. Data (lampiran 2 sampai dengan lampiran 6) adalah data kestabilan nyala api difusi *annulus jet* dengan berbagai variasi sudut *divergent quarl*.

##### 4.1.1.2. 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

$C$  = faktor koreksi (lampiran 17 sampai dengan lampiran 19)

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

$$\begin{aligned}
 D_{ud} &= \text{diameter saluran udara aksial (0,06 m)} \\
 D_{jet} &= \text{diameter saluran udara tangensial (0,0272 m)} \\
 d_{bb} &= \text{diameter orifis bahan bakar (0,004 m)} \\
 d_{ud} &= \text{diameter orifis udara aksial (0,02 m)} \\
 d_{jet} &= \text{diameter orifis udara tangensial (0,007 m)} \\
 A_{bb} &= \text{luas saluran bahan bakar (7,850.10}^{-5} \text{ m}^2\text{)} \\
 A_{ud} &= \text{luas saluran udara aksial (2,826.10}^{-3} \text{ m}^2\text{)} \\
 A_{jet} &= \text{luas saluran udara tangensial (5,808 10}^{-4} \text{ m}^2\text{)} \\
 A_{udara jet} &= \text{luas orifis saluran jet tangensial (7,065.10}^{-6} \text{ m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan data untuk data tanpa pemasangan *divergent quarl*

A. Massa alir udara aksial pada ketinggian ( $\Delta h$  minyak) = 30 mm

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{ud} \cdot A_{ud} \cdot v_{aksial}$$

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

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

$$v_{aksial} = (0,514) \frac{(0,02)^2}{(0,06)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 30) / 1000}{(1,208 \cdot (1 - (0,333)^4))}} = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{udara} = 1,208 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \cdot 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]} \cdot 1,160 \text{ [m.s}^{-1}\text{]} = 3,961 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$$

B. Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *lift off* :

$$\dot{m}_{bahan \text{ bakar}} = \rho_{bb} \cdot A_{bb} \cdot v_{bb}, \text{ dengan } \Delta h = 12 \text{ mm (Hg)}$$

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

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

$$v_{bb} = (0,484) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 12) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 3,134 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{bahan \text{ bakar}} = 2,009 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \cdot 7,850 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]} \cdot 3,134 \text{ [m.s}^{-1}\text{]} = 4,459 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

C. Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *blow off* :

$$\dot{m}_{bahan \text{ bakar}} = \rho_{bb} \cdot A_{bb} \cdot v_{bb}, \text{ dengan } \Delta h = 224 \text{ mm (Hg)}$$

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

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

$$v_{bb} = (0,528) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 224) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 14,748 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 2,009 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 7,850 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2] \cdot 14,748 [\text{m.s}^{-1}] = 2,326 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$$

**D. Massa alir udara tangensial pada ketinggian ( $\Delta h$  Hg) = 2 mm**

$$\dot{m}_{\text{jet}} = \rho_{\text{ud}} \cdot A_{\text{jet}} \cdot v_{\text{jet}}$$

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

$$\beta = \frac{d_{\text{jet}}}{D_{\text{jet}}} = \frac{0,007 \text{ m}}{0,0272 \text{ m}} = 0,257$$

$$v_{\text{jet}} = (0,115) \frac{(0,007)^2}{(0,0272)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 2) / 1000}{1,208 \cdot (1 - (0,257)^4)}} = 0,160 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{jet}} = 1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 5,808 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \cdot 0,160 [\text{m.s}^{-1}] = 1,125 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

Jadi untuk kecepatan total saluran udara tangensial adalah:

$$\dot{m}_{\text{jet}} = \dot{m}_{\text{udara jet}}$$

$$\rho_{\text{ud}} \cdot A_{\text{jet}} \cdot v_{\text{jet}} = \rho_{\text{ud}} \cdot 4A_{\text{udara jet}} \cdot v_{\text{udara jet}}$$

$$1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 5,808 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \cdot 0,160 [\text{m.s}^{-1}] = 1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 4(7,065 \cdot 10^{-6}) [\text{m}^2] \cdot v_{\text{udara jet}}$$

$$1,226 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1} = 3,414 \cdot 10^{-5} [\text{kg.m}^{-1}] \cdot v_{\text{udara jet}}$$

$$v_{\text{udara jet}} = 3,295 [\text{m.s}^{-1}]$$

Jadi untuk empat buah saluran udara tangensial, kecepatan masing – masing jet adalah  $0,824 [\text{m.s}^{-1}]$ . Dengan cara yang sama maka data hasil perhitungan dari hasil penelitian dapat dilihat pada lampiran 2 – 6.

#### 4.1.1.3. Visualisasi api

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

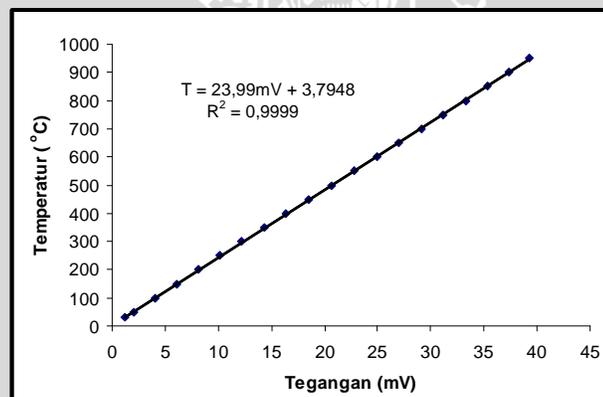
## 4.1.2. Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

### 4.1.2.1. Data penelitian

Untuk tiap variasi pengambilan data terdapat 9 titik pengukuran, pengambilan data tiap titik dilakukan selama 100 detik dan diperoleh 300 data temperatur yang ditampilkan dalam grafik fluktuasi temperatur (lampiran 7 s/d lampiran 16). Dari tiap titik ditentukan nilai rata-ratanya, kemudian diplot dalam grafik distribusi temperatur, sehingga dapat diketahui distribusi temperatur ke arah horizontal.

### 4.1.2.2. Pengukuran temperatur

Pengukuran temperatur dilakukan dengan proses konversi untuk mendapatkan persamaan yang menunjukkan korelasi antara tegangan (mV) yang dihasilkan *thermocouples* dengan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ). Proses tersebut dilakukan dengan mengukur tegangan yang dihasilkan *thermocouples* menggunakan *multimeter* dan pada saat yang sama temperatur pada api diukur menggunakan *digital thermometer*. Grafik korelasi tersebut adalah seperti gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Hubungan antara tegangan (mV) dengan Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Persamaan yang diperoleh dari grafik pada gambar 4.1 adalah:

$$T = 23,99\text{mV} + 3,7948$$

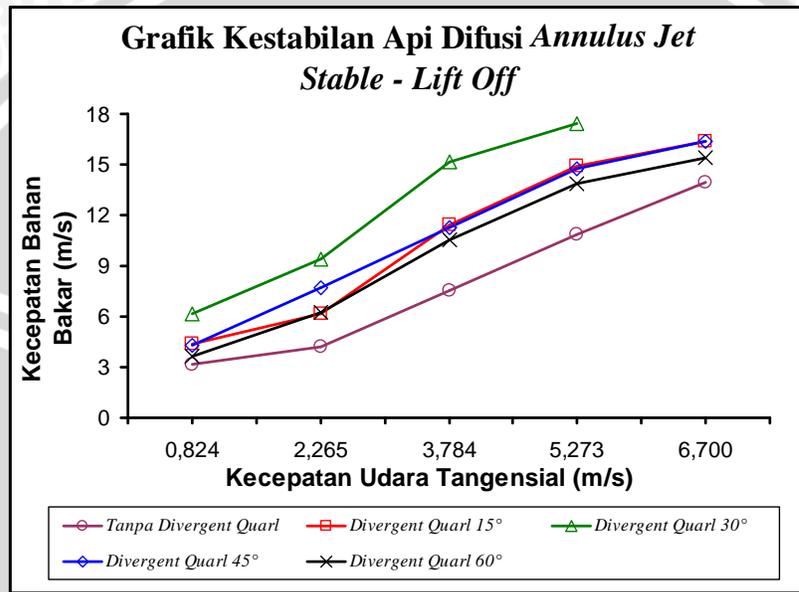
Dari grafik dan persamaannya terlihat bahwa hubungan antara tegangan dan temperatur memiliki kecenderungan yang linier dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) = 0,9999.

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 analog berupa tegangan dari sensor 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 *digital thermometer*.

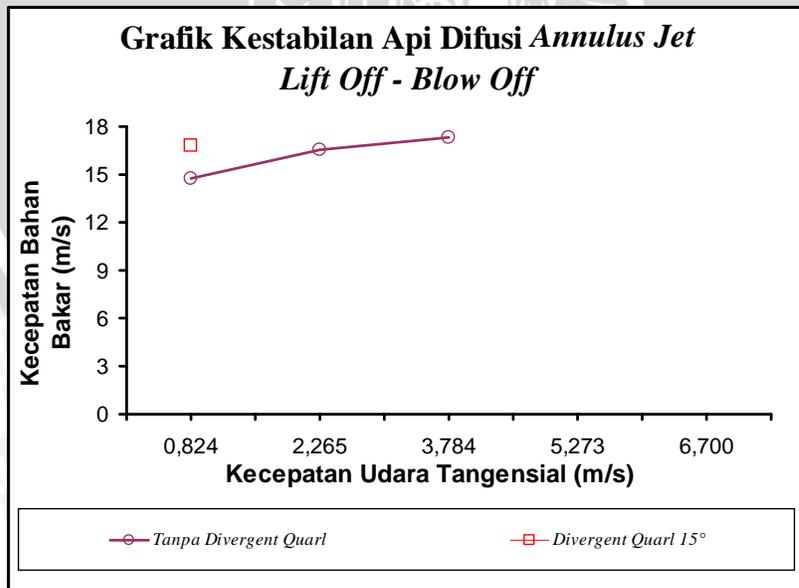
4.2. Pembahasan

4.2.1. Grafik kestabilan api difusi *annulus jet*

Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* menjelaskan hubungan antara kecepatan aliran udara tangensial dengan kecepatan aliran bahan bakar. Pada masing-masing variasi penelitian, grafik kestabilan api difusi *annulus jet* dibagi menjadi tiga bagian dengan melihat kecenderungan batas yang terjadi yaitu daerah api stabil, daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*. Batas masing-masing daerah tersebut didapat dengan menarik batas ketika api mengalami *lift off* dan *blow off*.



(a) *Stable - Lift Off*



(b) *Lift Off - Blow Off*

Gambar 4.2 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet*

Gambar 4.2 (a) dan (b) menunjukkan grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi penelitian, yaitu tanpa pemasangan *divergent quarl*, sudut *divergent quarl* 15°, 30°, 45° dan 60°. Sumbu horisontal merupakan kecepatan aliran udara tangensial sedangkan sumbu vertikal adalah kecepatan aliran bahan bakar.

Pada gambar 4.2 (a) terlihat daerah api *stable* dan daerah api *lift off*. Daerah api *stable* berada di bagian bawah kurva sedangkan daerah api *lift off* berada di bagian atas kurva. Pada gambar 4.2 (b) terlihat daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*. Daerah api *lift off* berada di bagian bawah kurva sedangkan daerah api *blow off* berada di bagian atas kurva. Semakin besar aliran udara tangensial maka *lift off* dan *blow off* memiliki kecenderungan semakin lambat terjadi. Hal ini dikarenakan semakin cepat aliran udara tangensial maka massa alir udara juga semakin besar, sehingga semakin banyak udara yang bereaksi dengan bahan bakar, akibatnya pembakaran yang terjadi juga semakin baik. Pada kecepatan aliran udara tangensial 0,824 m.s<sup>-1</sup> sampai dengan 6,700 m.s<sup>-1</sup> proses *stable - lift off* dan *lift off - blow off* mempunyai batas kecepatan yang berbeda. Hal ini terjadi karena semakin cepat aliran udara tangensial, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya *damköhler number* (*Da*) menjadi semakin besar, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) mencukupi dibandingkan waktu untuk mengalir (*characteristic flow time*). Hal ini mengakibatkan api mempunyai batas kecepatan tertentu untuk mengalami perubahan dari kondisi *stable* menuju *lift off* dan dari kondisi *lift off* menuju *blow off*, sehingga dapat diperoleh luasan daerah kestabilan.

Pada gambar 4.2 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa pada variasi tanpa pemasangan dan dengan pemasangan *divergent quarl* dengan sudut yang berbeda membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Pada grafik kestabilan dengan tanpa pemasangan *divergent quarl*, dimana luasan daerah kestabilan cukup kecil karena pada seluruh kecepatan aliran udara tangensial antara 0,824 m.s<sup>-1</sup> sampai dengan 6,700 m.s<sup>-1</sup> terjadi kondisi *lift off* pada kecepatan bahan bakar yang rendah untuk setiap penambahan kecepatan tangensial kemudian diikuti kondisi *blow off* apabila bahan bakar terus ditambah. Dan hanya pada kecepatan aliran udara yang tinggi yaitu 5,273 m.s<sup>-1</sup> dan 6,700 m.s<sup>-1</sup> tidak terjadi *blow off* melainkan hanya terjadi *lift off*. Pada kondisi lain dengan pemasangan *divergent quarl* 15° dan 30°, terlihat bahwa luasan daerah kestabilan menjadi lebih besar begitu juga kondisi *blow off* semakin sulit terjadi walaupun bahan bakar terus ditambah. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh sudut *divergent quarl* yang semakin besar menyebabkan terjadinya peningkatan aliran

resirkulasi yang berarti meningkatkan proses difusi. Lain halnya dengan pemasangan *divergent quarl* 45° dan 60°, dimana luasan daerah kestabilan cenderung semakin menyempit, hal ini menunjukkan bahwa setelah melebihi sudut 30° terjadi penurunan aliran resirkulasi yang berarti proses difusi berlangsung pada kondisi yang kurang baik.

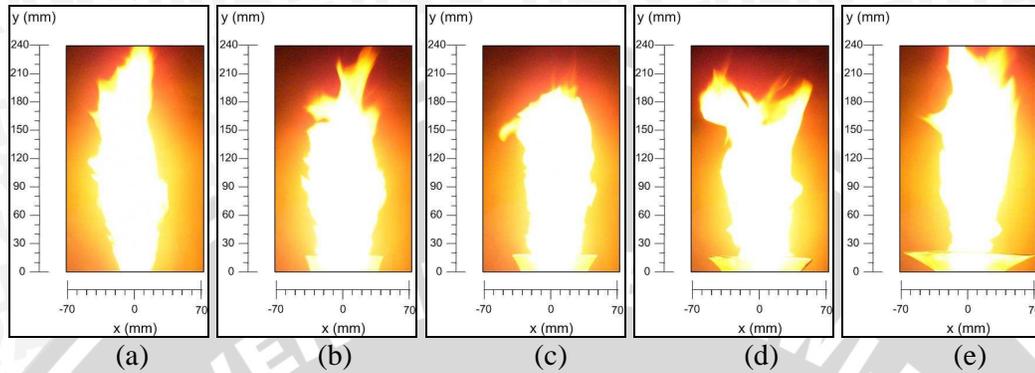
Pada pemasangan *divergent quarl* dengan sudut 30°, dimana pada kondisi ini memiliki luasan daerah kestabilan api yang paling luas. Pada semua kecepatan aliran udara tangensial 0,824 m.s<sup>-1</sup> sampai dengan 6,700 m.s<sup>-1</sup> sudah tidak terlihat adanya *blow off*, sehingga api tetap menyala pada kondisi *lift off* meskipun massa alir bahan bakar pada kondisi maksimum. Hal ini terjadi karena pada kondisi tersebut luasan zona reaksi bahan bakar dan udara berada pada kondisi maksimum, sehingga terjadi peningkatan aliran resirkulasi yang berarti semakin banyak pula jumlah gas yang bersirkulasi, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara pembakaran serta proses perpindahan panas antara campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar ke bahan bakar terjadi pada kondisi yang paling baik. Aliran resirkulasi karena pemasangan *divergent quarl* mengakibatkan peningkatan proses pemanasan awal terhadap reaktan. Semakin besar proses pemanasan awal mengakibatkan terjadinya penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar dan udara, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Hal ini mengakibatkan molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986) bahwa semakin luas zona reaksi dan semakin tinggi temperatur awal pembakaran maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

Semakin besar sudut *divergent quarl* yang digunakan, maka jumlah gas yang bersirkulasi juga semakin besar. Hal ini akan mengakibatkan ketidakstabilan pada aliran yang semakin besar pula. Ketidakstabilan aliran ini akan memperkuat proses pengadukan reaktan serta meningkatkan intensitas turbulensi, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara lebih homogen akibat aliran *swirl* yang dibangkitkan oleh kombinasi antara aliran udara aksial dan aliran udara tangensial. Akibatnya pembakaran yang terjadi juga semakin baik dan luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Akan tetapi dengan pemasangan sudut *divergent quarl* yang terlalu besar yang terjadi adalah sebaliknya, dimana terjadi penurunan luasan daerah kestabilan api. Hal ini terjadi karena adanya penurunan luasan zona reaksi akibat aliran separasi (*separation flow*) pada *quarl opening* yang menyebabkan penurunan proses pengadukan reaktan. Akibatnya terjadi penurunan jumlah gas yang bersirkulasi, sehingga

pembakaran terjadi pada kondisi yang kurang baik.

#### 4.2.2. Visualisasi api difusi *annulus jet*

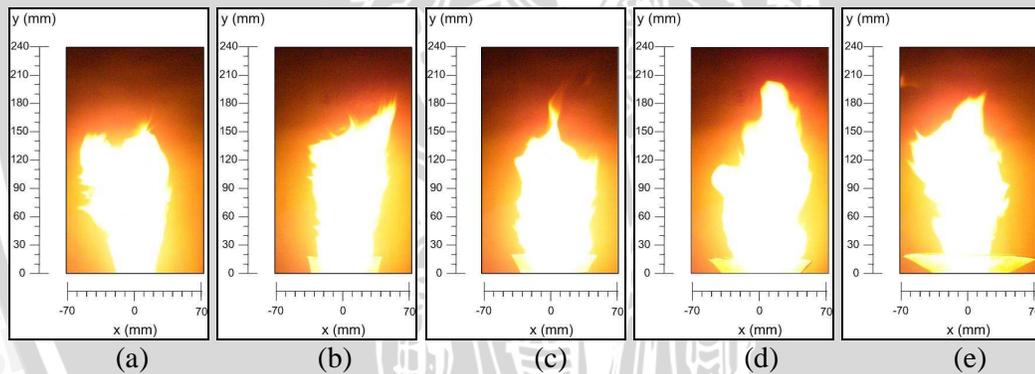
Dari penelitian yang telah dilakukan maka dapat diperoleh visualisasi api difusi *annulus jet* sebagai berikut:



Gambar 4.3 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *divergent quarl*

$$U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}, V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}, W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$$

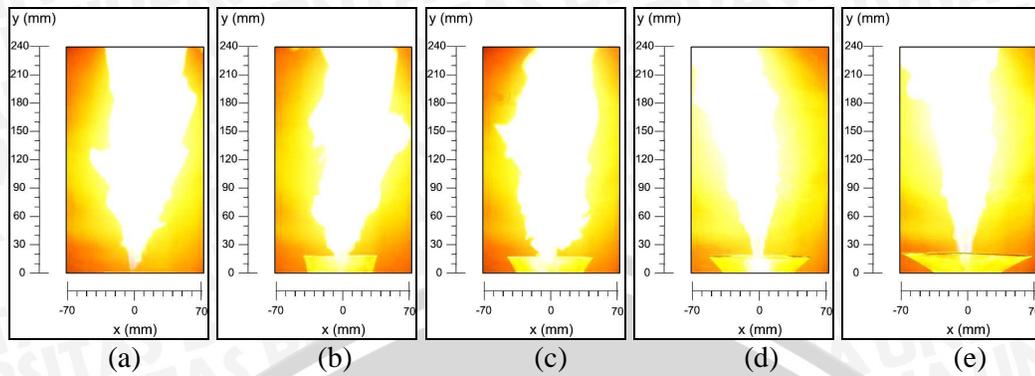
- (a) Tanpa *divergent quarl*    (b) *Divergent quarl* 15°    (c) *Divergent quarl* 30°  
 (d) *Divergent quarl* 45°    (e) *Divergent quarl* 60°



Gambar 4.4 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *divergent quarl*

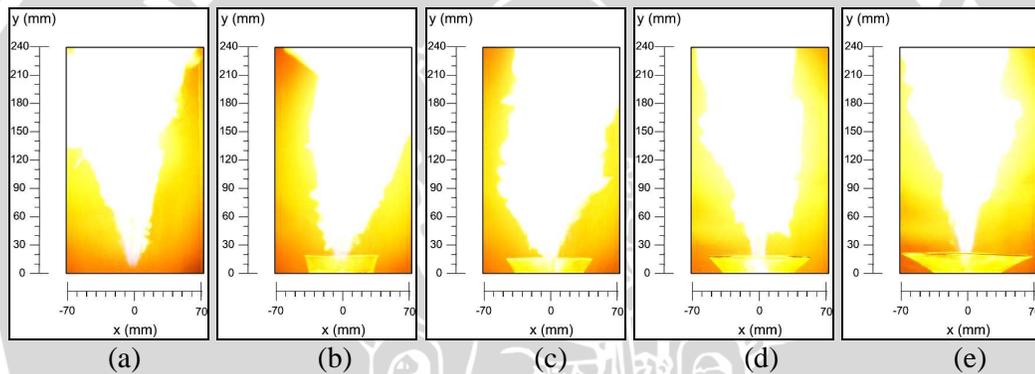
$$U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}, V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}, W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$$

- (a) Tanpa *divergent quarl*    (b) *Divergent quarl* 15°    (c) *Divergent quarl* 30°  
 (d) *Divergent quarl* 45°    (e) *Divergent quarl* 60°



Gambar 4.5 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi sudut *divergent quarl*

- (a) Tanpa *divergent quarl*,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 4,252 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$
- (b) *Divergent quarl*  $15^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 6,203 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$
- (c) *Divergent quarl*  $30^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 9,370 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$
- (d) *Divergent quarl*  $45^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,675 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$
- (e) *Divergent quarl*  $60^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 6,273 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.6 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi sudut *divergent quarl*

- (a) Tanpa *divergent quarl*,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 10,882 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$
- (b) *Divergent quarl*  $15^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 14,899 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$
- (c) *Divergent quarl*  $30^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 17,409 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$
- (d) *Divergent quarl*  $45^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 14,796 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$
- (e) *Divergent quarl*  $60^\circ$ ,  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 13,857 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

Pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 terlihat visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *divergent quarl* dengan kecepatan aliran bahan bakar dan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , sedangkan kecepatan aliran udara tangensial adalah  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  untuk Gambar 4.3 dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  untuk Gambar 4.4. Semakin besar sudut *divergent quarl* yang digunakan, yaitu mulai dari tanpa pemasangan *divergent quarl*, *divergent quarl*  $15^\circ$  dan  $30^\circ$ , maka api cenderung semakin memendek dan mengalami penebalan ke arah horisontal. Hal ini dikarenakan semakin besar sudut *divergent quarl* maka kecepatan aksial udara akan mengalami penurunan, sehingga akan memberikan cukup waktu bagi bahan bakar dan

udara untuk berdifusi. Adanya waktu yang cukup untuk proses difusi akan meningkatkan homogenitas campuran yang mengakibatkan nyala api berkembang dari sisi muara sehingga api cenderung menjadi pendek dan tebal. Luasan zona reaksi bahan bakar dan udara yang semakin besar dan adanya aliran *swirl* yang menimbulkan zona resirkulasi menyebabkan semakin banyak pula jumlah gas yang bersirkulasi sehingga efek pemanasan awal terhadap reaktan menjadi semakin baik. Akan tetapi untuk sudut *divergent quarl* yang terlalu besar, yaitu *divergent quarl*  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ , yang terjadi adalah sebaliknya, yaitu api cenderung semakin menipis dan mengalami pemanjangan. Hal ini disebabkan karena sudut *divergent quarl* yang terlalu besar menyebabkan adanya gradien tekanan yang semakin besar. Gradien tekanan ini sebagai akibat dari perubahan luas penampang mendadak (*sudden expansion*) sehingga mengakibatkan terciptanya dua zona aliran, yaitu zona aliran utama dan zona aliran separasi (*separation flow*). Adanya zona aliran separasi ini sangat merugikan karena akan menurunkan *pressure recovery* dan *heat recovery* maksimum serta akan merubah pola aliran api sebagai akibat dari adanya gradien tekanan pada zona aliran utama dan zona aliran separasi.

Pada gambar 4.3 untuk kecepatan udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ , pengaruh dari pemasangan *divergent quarl* sangat signifikan, yaitu mulai dari tanpa *divergent quarl*, *divergent quarl*  $15^\circ$ , dan  $30^\circ$ , api cenderung semakin memendek dan mengalami penebalan ke arah horizontal. Sedangkan untuk *divergent quarl*  $45^\circ$  dan  $60^\circ$  efek dari perubahan pola aliran api sebagai akibat dari aliran separasi begitu terlihat, dimana terjadi api yang cenderung menipis dan memanjang. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari aliran separasi menyebabkan penurunan luasan zona reaksi bahan bakar dan udara. Pada gambar 4.4 untuk kecepatan udara tangensial  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  pengaruh dari pemasangan *divergent quarl* kurang begitu signifikan, sehingga api cenderung pada kondisi uniform. Hal ini disebabkan karena semakin besar kecepatan udara tangensial akan menyebabkan bergesernya titik separasi (*separation point*) menjauh dari *burner exit plane* sehingga akan mengurangi rusaknya pola aliran api akibat aliran separasi.

Pada hampir semua proses pembakaran difusi unsur hidrokarbon  $C_xH_y$ , terjadi pemanasan mendadak pada bahan bakar sebelum terdifusi sempurna dengan udara. Akibatnya unsur hidrokarbon terpecah menjadi unsur-unsur penyusunnya. Unsur karbon terbakar lebih dahulu dengan nyala kuning, sedangkan unsur hidrogen terbakar setelah unsur karbon terbakar dengan nyala yang hampir tak terlihat. Akan tetapi karena perbedaan fase unsur karbon dan hidrogen, unsur karbon akan habis terbakar setelah

unsur hidrogen habis terbakar, sehingga secara umum pada hampir semua kasus, warna api hampir seluruhnya didominasi warna kuning yang disebabkan oleh radiasi pembentukan jelaga. Pada kecepatan udara tangensial rendah, sangat terlihat pengaruh dari pemasangan *divergent quarl* dimana sudut yang paling optimum adalah  $30^\circ$ . Pada kondisi ini nyala api memiliki luasan zona reaksi yang besar terlihat dari bentuk api yang seragam mulai dari pangkal nyala sampai ujung nyala api. Hal ini disebabkan karena adanya resirkulasi produk panas pembakaran yang baik, dimana pada umumnya aliran resirkulasi hanya terjadi pada kecepatan udara tangensial yang tinggi, dan hal ini sesuai dengan tujuan dari pemasangan *divergent quarl* itu sendiri, yaitu meningkatkan temperatur pembakaran dengan mengurangi jumlah udara berlebih yang digunakan, sehingga dengan cara ini diperoleh dua macam keuntungan yaitu temperatur pembakaran yang lebih tinggi serta mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk peralatan penyuplai udara.

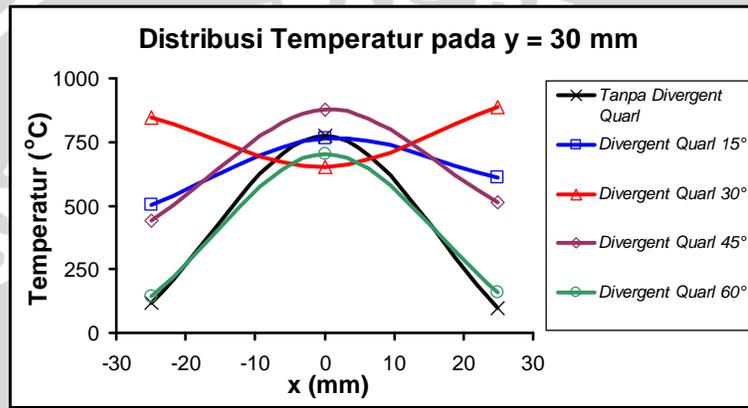
Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 terlihat visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi pemasangan *divergent quarl* dengan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , sedangkan kecepatan aliran udara tangensial adalah  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  untuk Gambar 4.5 dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  untuk Gambar 4.6. Kondisi api *lift off* seperti terlihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 terjadi ketika kecepatan aliran bahan bakar  $V$  dinaikkan. Saat kondisi *lift off*, struktur api secara umum lebih turbulen dari pada saat kondisi stabil. Hal ini dikarenakan kecepatan aliran bahan bakar meningkat, sehingga angka *Reynolds* juga akan meningkat, akibatnya api menjadi semakin turbulen. Ketika kecepatan udara tangensial semakin tinggi, maka untuk mencapai kondisi *lift off* diperlukan kecepatan bahan bakar yang lebih tinggi dari pada saat kecepatan udara tangensial rendah. Hal ini disebabkan karena semakin besar kecepatan udara tangensial, maka massa alir udara tangensial juga meningkat, sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* akan meningkatkan intensitas turbulensi, sehingga zona resirkulasi dan proses difusi akan meningkat yang berarti bahwa pembakaran semakin mendekati sempurna. Fenomena terjadinya *lift off* ini merupakan suatu kondisi pembakaran dimana terjadi ketidakseimbangan antara kecepatan aliran bahan bakar pada pangkal api dan kecepatan penyalaan maksimum dalam proses pencampuran antara aliran *jet* bahan bakar dan fluida pengoksidasi. Hal ini karena pada dasarnya api memiliki kecenderungan untuk tetap bertahan *uniform*, sehingga dengan peningkatan kecepatan aliran bahan bakar yang tinggi, pangkal api tetap bertahan *uniform*. Ketika  $V$  dinaikkan lagi, maka proses pencampuran udara dan

bahan bakar menjadi semakin tidak seimbang, sehingga api akan terus bergerak ke atas dan terjadi *lift off* semakin besar sampai api *blow off* (padam).

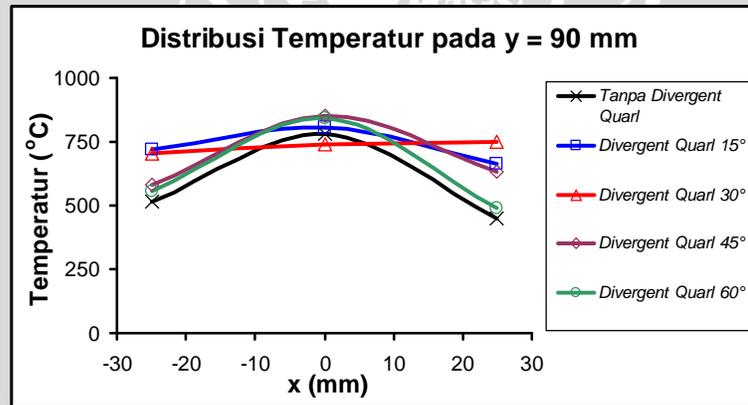
#### 4.2.3. Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

Data temperatur dari hasil penelitian diplot dalam grafik fluktuasi temperatur untuk tiap titik pengamatan. Kemudian data temperatur pada tiap titik pengamatan ditentukan nilai temperatur rata-ratanya dan diplot dalam grafik distribusi temperatur untuk proses analisa. Grafik-grafik tersebut menunjukkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur.

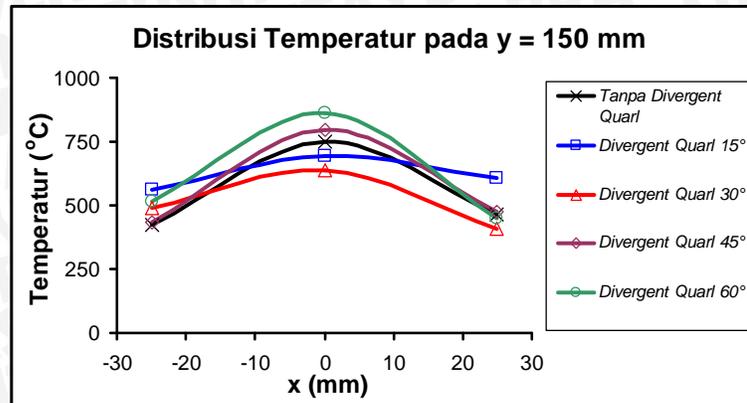
##### 4.2.3.1. Distribusi temperatur berdasar sudut *divergent quarl*



(a) Posisi sensor pada  $y = 30$  mm



(b) Posisi sensor pada  $y = 90$  mm

(c) Posisi sensor pada  $y = 150$  mm

Gambar 4.7 Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi sudut *divergent quarl*  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

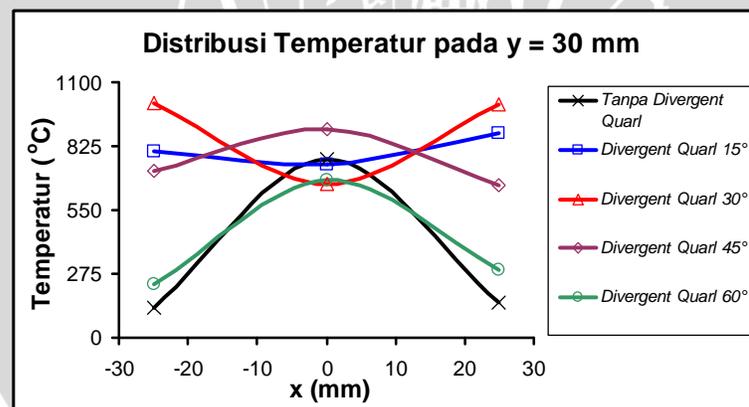
Gambar 4.7 (a), (b), dan (c) menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi penelitian, yaitu tanpa pemasangan *divergent quarl*, sudut *divergent quarl*  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$  serta dengan peletakan sensor pada sumbu  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm, dan  $y = 150$  mm. Kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , kecepatan aliran bahan bakar  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ . Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu  $x$ , sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur.

Hampir pada semua kasus terlihat bahwa pada sumbu api ( $x = 0$  mm) cenderung memiliki temperatur yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada jarak tersebut bahan bakar memiliki kecepatan yang paling tinggi, sehingga terdapat banyak aliran massa bahan bakar, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara dapat berlangsung secara maksimal. Pada tepi api ( $x = -25$  mm dan  $x = 25$  mm), rata-rata dihasilkan temperatur yang lebih rendah karena pada jarak tersebut terdapat banyak suplai udara pembakaran, sehingga tidak semua atom-atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia dengan bahan bakar untuk membentuk produk pembakaran, akibatnya sejumlah kalor akan terbuang keluar sebagai akibat adanya pendinginan oleh aliran udara tersebut. Akan tetapi untuk pemasangan *divergent quarl*  $30^\circ$  pada posisi sensor  $y = 30$  mm dan  $y = 90$  mm terlihat bahwa yang terjadi adalah sebaliknya, dimana temperatur pada sumbu api ( $x = 0$  mm) sama dan bahkan lebih rendah dari pada temperatur pada tepi api. Hal ini disebabkan karena adanya resirkulasi produk pembakaran pada daerah tersebut sebagai akibat dari ketidakseimbangan antara kecepatan gas bahan bakar pada sumbu api ( $x = 0$  mm) dengan kombinasi kecepatan aliran udara tangensial dan aksial yang

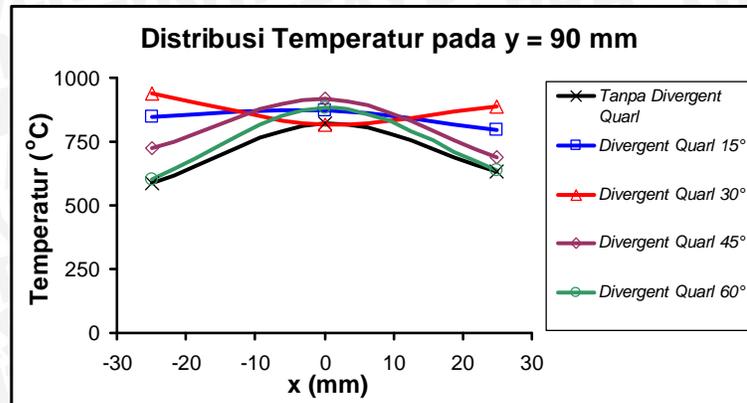
sedemikian, sehingga proses difusi berlangsung pada kondisi yang kurang baik. Efek resirkulasi ini mempengaruhi reaktan untuk bergerak ke arah tangensial menjauhi mulut nosel sehingga terjadi proses difusi yang baik pada posisi  $x = -25$  mm dan  $x = 25$  mm.

Pada Gambar 4.7 (b) dan (c) terlihat bahwa distribusi temperatur yang terjadi semakin merata. Pada grafik distribusi temperatur  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm terlihat temperatur terdistribusi dengan merata ke arah horisontal dengan tingkat perbedaan temperatur yang relatif rendah dibandingkan dengan distribusi temperatur pada  $y = 30$  mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi tersebut terjadi proses pencampuran bahan bakar dan udara yang paling baik, sehingga terjadi pembakaran yang merata pada hampir seluruh daerah pencampuran.

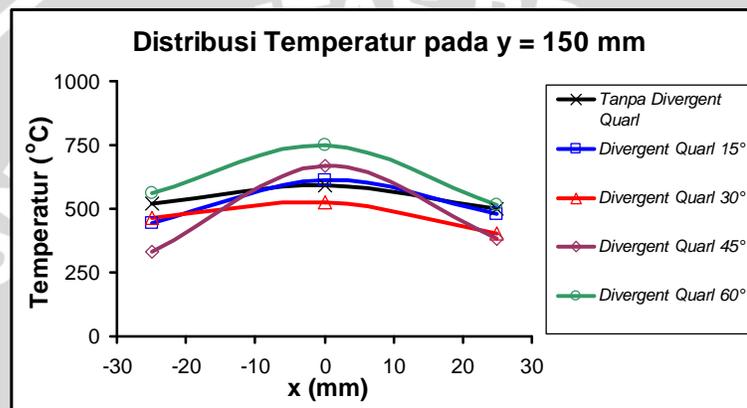
Pada kecepatan aliran udara tangensial yang rendah, efek dari pemasangan *divergent quarl* sangat terlihat pada daerah terdekat dari *burner exit* ( $y = 30$  mm), dimana temperatur pembakaran terdistribusi secara tidak merata dalam arah horisontal dan vertikal dengan tingkat perubahan temperatur yang cukup besar. Hal ini terlihat dari distribusi temperatur yang berbeda pada berbagai variasi pemasangan *divergent quarl*. Selanjutnya akan dapat diketahui pengaruh dari pemasangan *divergent quarl* pada kondisi lain dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial. Hal ini dapat dilihat pada grafik 4.8 berikut ini:



(a) Posisi sensor pada  $y = 30$  mm



(b) Posisi sensor pada y = 90 mm



(c) Posisi sensor pada y = 150 mm

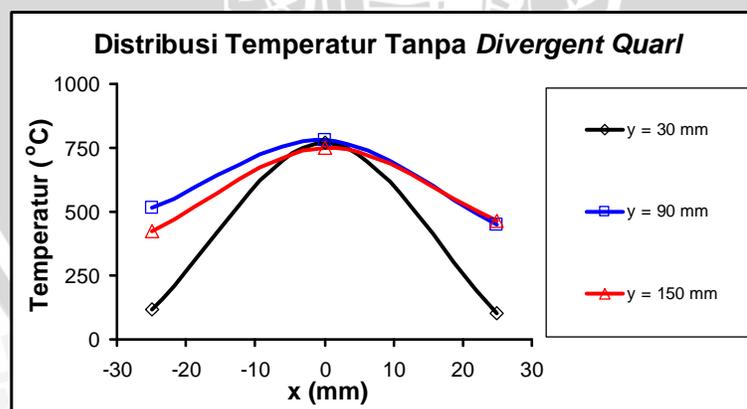
Gambar 4.8 Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi sudut *divergent quarl*  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

Pada kecepatan aliran udara tangensial yang tinggi, Gambar 4.8 (a), (b), dan (c) terlihat pengaruh pemasangan *divergent quarl* terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan api dimana mulai dari tanpa pemasangan *divergent quarl*, sudut *divergent quarl*  $15^\circ$  dan  $30^\circ$ , temperatur terdistribusi semakin merata ke arah horisontal. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan luasan zona reaksi akibat perubahan luas penampang saluran yang semakin besar, serta kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh aliran udara tangensial maupun aksial mengakibatkan terjadinya batas gesekan (*shear layer*) yang lebih besar antara aliran resirkulasi dan daerah utama. Akibatnya terjadi peningkatan intensitas turbulensi yang menyebabkan semakin banyak jumlah produk panas pembakaran yang bersirkulasi, sehingga terjadi peningkatan perpindahan panas antara gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar dan oksidator). Adanya peningkatan pemanasan awal mengakibatkan terjadinya penambahan energi pada molekul-molekul reaktan, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan energi kinetik

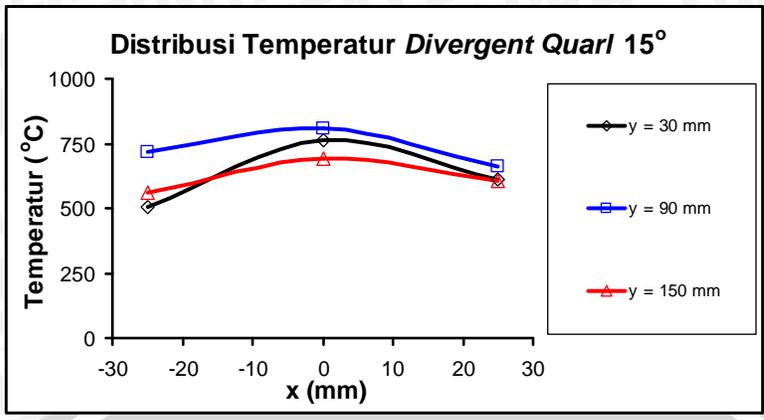
partikel gas yaitu  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$  (Halliday,1978: 772), dengan k adalah *konstanta Boltzmann*. Dari rumus tersebut terlihat bahwa temperatur sebanding dengan energi kinetik molekul, jadi semakin tinggi energi kinetik dari molekul, maka temperatur juga akan semakin meningkat. Pada pemasangan *divergent quarl* 45° dan 60° terlihat bahwa temperatur terdistribusi semakin tidak merata, hal ini disebabkan karena terjadi penurunan luasan zona reaksi walaupun tersedia ruang yang semakin besar. Penurunan luasan zona reaksi ini dikarenakan terjadi aliran separasi (*separation flow*) akibat gradien tekanan yang terlalu besar pada *quarl opening*. Fenomena ini menyebabkan terpecahnya aliran menjadi dua zona, yaitu zona aliran utama dan zona aliran separasi yang mengakibatkan penurunan intensitas turbulensi, sehingga jumlah produk panas pembakaran yang bersirkulasi juga semakin menurun.

Secara keseluruhan dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial maka akan didapatkan distribusi temperatur yang lebih merata pada beberapa kondisi dengan pemasangan berbagai variasi sudut *divergent quarl*. Hal ini disebabkan adanya kecepatan aliran udara tangensial yang cukup besar akan meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun sehingga menimbulkan zona resirkulasi, akibatnya terjadi keseimbangan antara kecepatan reaksi dan kecepatan aliran, sehingga proses difusi berlangsung pada kondisi yang baik. Akibatnya terjadi pemendekan api ke arah vertikal dan penebalan api ke arah horisontal sehingga distribusi temperatur akan lebih merata.

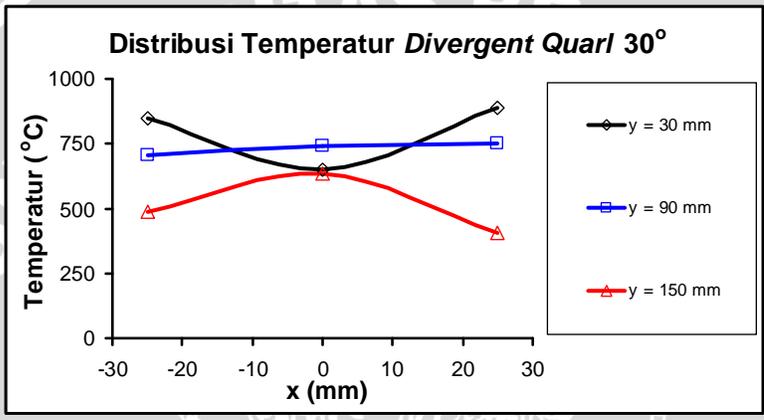
#### 4.2.3.2. Distribusi temperatur berdasar jarak aksial



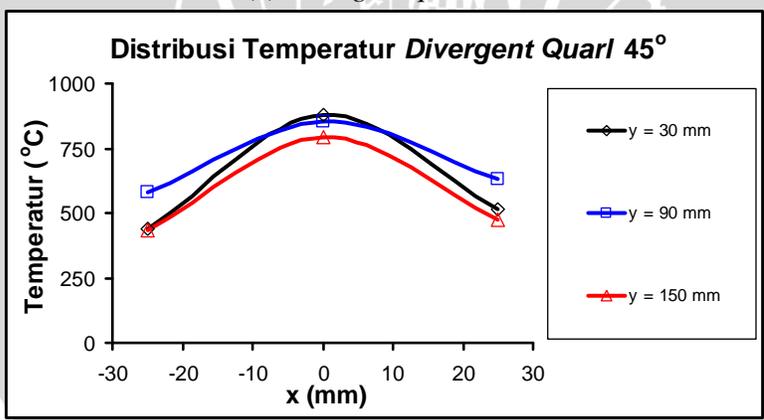
(a) Tanpa *divergent quarl*



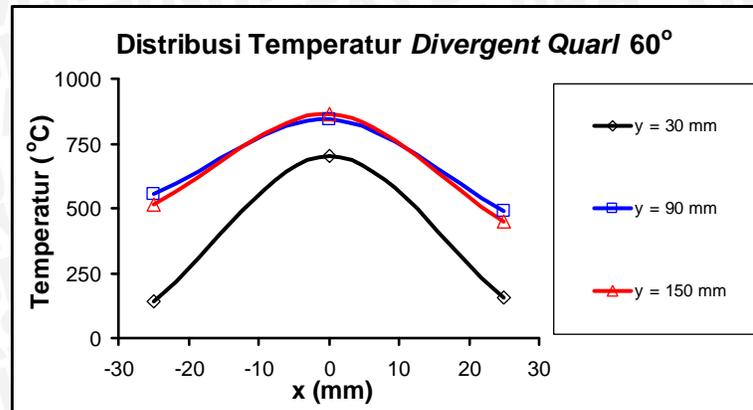
(b) Divergent quarl 15°



(c) Divergent quarl 30°



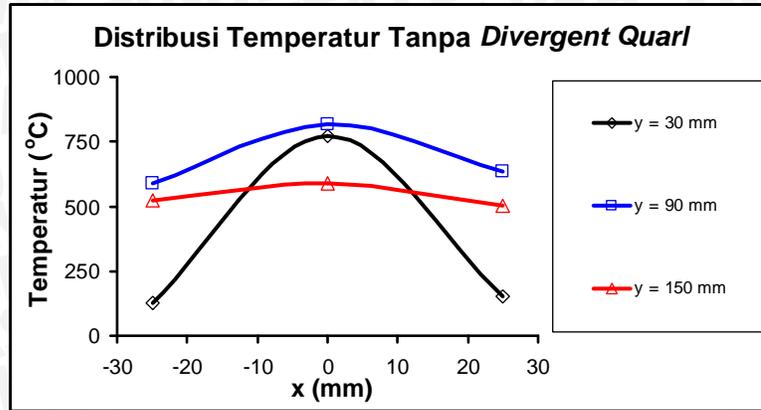
(d) Divergent quarl 45°

(e) *Divergent quarl 60°*

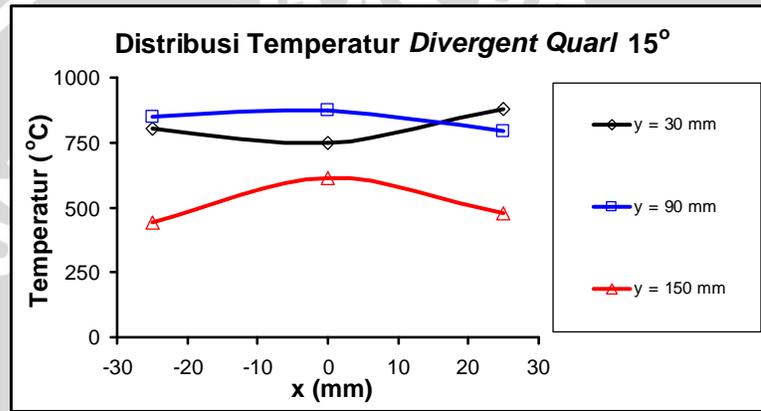
Gambar 4.9 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

Gambar 4.9 (a), (b), (c), (d) dan (e) menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi jarak aksial, yaitu pada sumbu  $y = 30 \text{ mm}$ ,  $y = 90 \text{ mm}$ , dan  $y = 150 \text{ mm}$  serta dengan berbagai variasi penelitian, yaitu tanpa pemasangan *divergent quarl*, sudut *divergent quarl*  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ , kecepatan aliran bahan bakar  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ . Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu  $x$ , sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur.

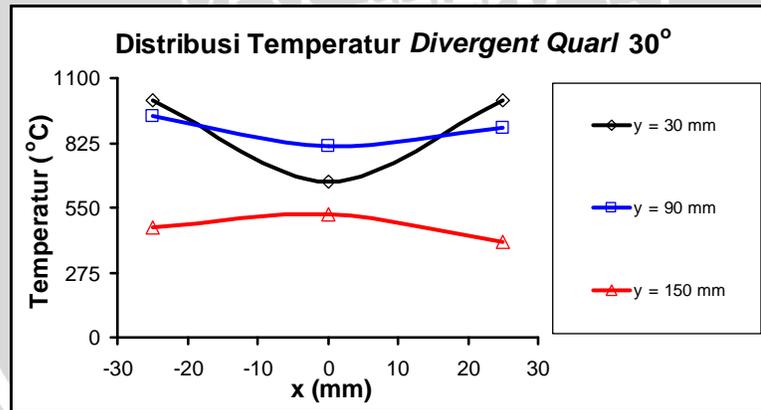
Dari gambar 4.9 terlihat bahwa distribusi temperatur ke arah horizontal pada posisi sensor temperatur  $y = 30 \text{ mm}$ ,  $y = 90 \text{ mm}$  dan  $y = 150 \text{ mm}$  memiliki kecenderungan yang berbeda. Dari grafik terlihat bahwa mulai dari tanpa pemasangan *divergent quarl*, *divergent quarl*  $15^\circ$  dan  $30^\circ$  cenderung memiliki distribusi temperatur yang semakin merata. Hal ini disebabkan karena semakin besar sudut *divergent quarl* mengakibatkan terjadinya peningkatan zona resirkulasi yang berarti jumlah produk panas pembakaran yang bersirkulasi semakin banyak, sehingga api cenderung semakin memendek dan menebal.



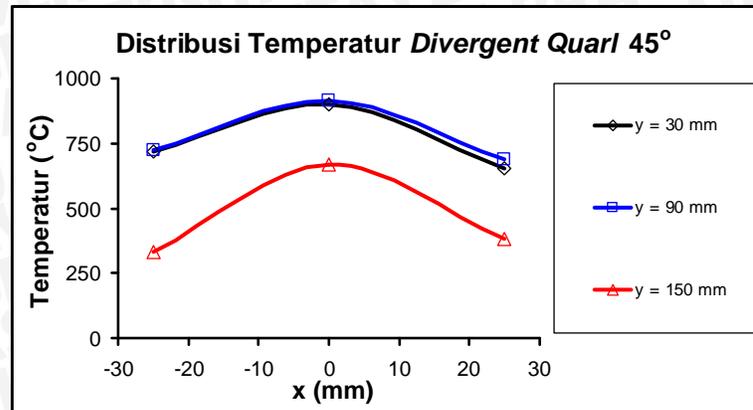
(a) Tanpa divergent quarl



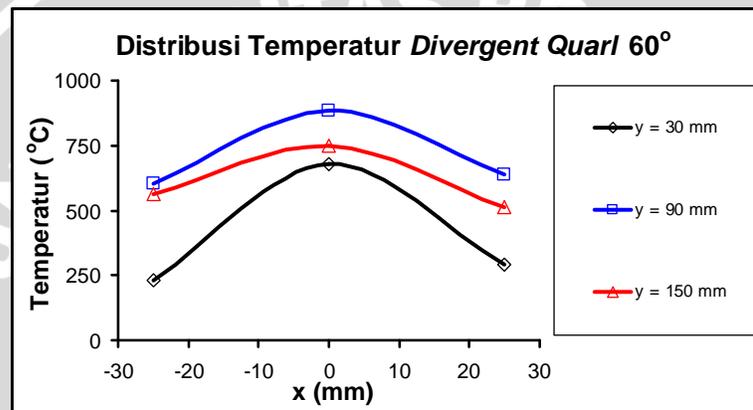
(b) Divergent quarl 15°



(c) Divergent quarl 30°



(d) Divergent quarl 45°



(e) Divergent quarl 60°

Gambar 4.10 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

Pada kecepatan aliran udara tangensial yang lebih besar  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  (Gambar 4.10), pengaruh pemasangan *divergent quarl* sangat jelas terlihat. Pada gambar 4.10 (a), (b), (c), (d), dan (e) distribusi temperatur cenderung lebih tidak seragam. Pada  $y = 150 \text{ mm}$  cenderung memiliki temperatur yang lebih rendah daripada  $y = 30 \text{ mm}$  dan  $y = 90 \text{ mm}$ . Hal ini disebabkan oleh kecepatan tangensial udara yang semakin besar akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* ini akan meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi, sehingga api mengalami pemendekan secara seragam. Pemendekan dimensi api inilah yang mengakibatkan temperatur berkurang pada jarak peletakan sensor yang paling jauh dari nosel ( $y = 150 \text{ mm}$ ). Selanjutnya pada pemasangan *divergent quarl* 15° dan 30° terlihat bahwa temperatur pada tepi api ( $x = -25 \text{ mm}$  dan  $x = 25 \text{ mm}$ ) lebih tinggi dari pada temperatur pada sumbu api ( $x = 0 \text{ mm}$ ), pada *divergent quarl* 15° fenomena ini hanya terjadi pada  $y = 30 \text{ mm}$ , sedangkan pada *divergent quarl* 30° fenomena ini terjadi pada  $y = 30 \text{ mm}$  dan  $y = 90 \text{ mm}$ . Hal ini

disebabkan karena pada kecepatan udara tangensial yang besar, *divergent quarl* 30° memiliki luasan zona reaksi yang paling besar. Akibatnya terjadi peningkatan batas gesekan (*shear layer*) antara aliran udara aksial dan tangensial, sehingga udara dan bahan bakar yang mengalir pada daerah pusat sumbu akan berkumpul pada tepi *annulus* sebagai akibat dari gaya sentrifugal, sedangkan pada daerah pusat sumbu akan terjadi aliran resirkulasi produk pembakaran yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga untuk *divergent quarl* 30°, hampir pada seluruh zona reaksi terjadi aliran resirkulasi yang mengakibatkan temperatur pada tepi api ( $x = -25$  mm dan  $x = 25$  mm) lebih tinggi dari pada temperatur pusat sumbu ( $x = 0$  mm).

#### 4.2.4. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet*

Lampiran 7 s/d Lampiran 16 menunjukkan fluktuasi temperatur dari data yang diperoleh. Pada kecepatan udara tangensial rendah  $W = 2,265$  m.s<sup>-1</sup> dan posisi peletakan sensor  $y = 30$  mm temperatur cenderung tidak terlalu fluktuatif pada bagian tengah api. Hal ini berarti bahwa pada daerah tersebut api memiliki kestabilan yang baik, sehingga temperatur yang terukur berada disekitar nilai temperatur rata-rata data. Pada kondisi ini terjadi aliran resirkulasi yang cukup baik sehingga mengakibatkan proses difusi dan homogenitas campuran bahan bakar dan udara lebih baik, maka pembakaran yang terjadi lebih cepat dan hampir dalam waktu yang bersamaan (spontan). Kondisi yang sama terjadi pada bagian tepi api ( $x = -25$  mm dan  $x = 25$  mm), karena pada posisi tersebut gerakan api dipengaruhi oleh *small eddy scale*, sehingga temperatur yang terukur mendekati temperatur rata-rata data. Pada posisi sensor  $y = 90$  mm, temperatur yang terukur cenderung lebih fluktuatif dari pada  $y = 30$  mm. Hal ini disebabkan karena gerakan api dipengaruhi oleh *large eddy scale* walaupun masih terlihat adanya efek dari *small eddy scale*, sehingga temperatur yang terukur cenderung lebih fluktuatif. Pada posisi sensor yang paling jauh dari nosel, yaitu pada  $y = 150$  mm, gerakan api dipengaruhi oleh *large eddy scale*, sehingga temperatur berfluktuasi semakin tinggi dari nilai temperatur rata-rata data. 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 udara tangensial yang tinggi  $W = 5,273$  m.s<sup>-1</sup> gerakan api semakin tidak teratur dan temperatur yang terukur cenderung lebih fluktuatif pada semua kondisi dengan tingkat *eddy size* yang lebih kecil, hal ini mengindikasikan bahwa dengan memperbesar kecepatan aliran udara tangensial akan mengakibatkan terjadinya

peningkatan kestabilan api.

Semakin besar sudut *divergent quarl*, maka aliran udara semakin dipengaruhi oleh *large eddy scale*, walaupun masih terlihat adanya *small eddy scale* pada aliran udara. Hal ini bisa dilihat pada *divergent quarl*  $60^\circ$  dengan kecepatan aliran udara  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ , fluktuasi temperatur yang terjadi mengindikasikan bahwa gerakan api semakin tidak teratur dengan tingkat *eddy scale* yang lebih besar. Fenomena ini disebabkan oleh aliran separasi (*separation flow*) sebagai akibat adanya gradien tekanan pada zona aliran utama dan zona aliran separasi. Hal ini mengakibatkan rusaknya pola aliran api sehingga api mempunyai tingkat kestabilan kurang baik. Begitu juga pada aliran udara tangensial yang tinggi  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$ , gerakan api cenderung hanya dipengaruhi oleh *large eddy scale* pada aliran baik di bagian tengah maupun bagian tepi api sehingga temperatur cenderung fluktuatif. Pada *divergent quarl*  $30^\circ$  fluktuasi temperatur mengindikasikan bahwa gerakan api dipengaruhi oleh *small eddy scale* walaupun masih terlihat adanya efek dari *large eddy scale*, akan tetapi pada kondisi ini tidak terlihat adanya zona separasi sehingga resirkulasi terjadi secara maksimal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tingkat kestabilan api mencapai maksimum pada sudut *divergent quarl*  $30^\circ$ .

Secara keseluruhan fluktuasi temperatur akan semakin berkurang jika *small eddy scale* yang mempengaruhi gerakan api semakin besar, baik pada aliran udara maupun pada gerakan api, sehingga kestabilan api juga semakin meningkat. Akan tetapi tingkat kestabilan api tidak hanya dipengaruhi oleh *scale of turbulence* yang dalam hal ini adalah *large eddy scale* dan *small eddy scale*, terdapat beberapa faktor lain yang dapat mempengaruhi tingkat kestabilan api diantaranya adalah luasan zona reaksi dan aliran resirkulasi.

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Dari analisis data yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Semakin besar sudut *divergent quarl* yang dipasang pada *annulus* udara mengakibatkan kestabilan nyala api difusi *annulus jet* semakin meningkat dan kemudian kestabilan nyala akan menurun seiring bertambah besarnya sudut *divergent quarl*. Daerah kestabilan api difusi *annulus jet* terbesar diperoleh pada pemasangan *divergent quarl* dengan sudut  $30^\circ$ .
- Temperatur api difusi *annulus jet* semakin terdistribusi merata ke arah horisontal pada sudut *divergent quarl* yang paling optimal, sehingga distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling merata diperoleh pada pemasangan *divergent quarl* dengan sudut  $30^\circ$ . Dari data temperatur juga didapatkan hasil bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada bagian tengah sumbu api.

### 5.2. Saran

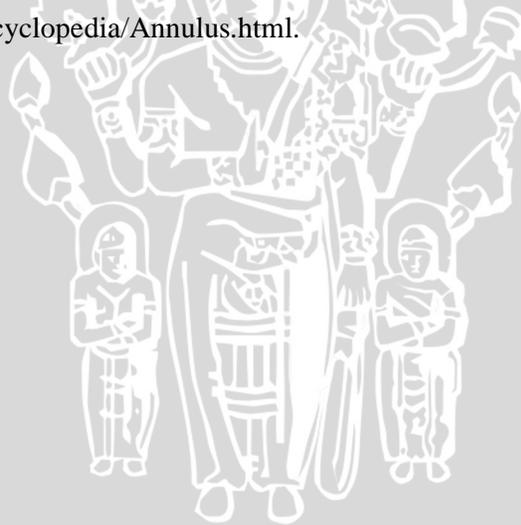
Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat dilakukan beberapa penelitian lebih lanjut mengenai:

- Karakteristik pola aliran fluida berputar yang melalui *divergent quarl* pada *annulus udara*.
- Pemasangan *divergent quarl* dengan diameter pipa bahan bakar yang bervariasi.
- Studi tentang emisi gas buang hasil pembakaran pada api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Borman, G., 1998, *Combustion engineering*, Wisconsin: Mc Graw Hill.
- Cheng R. K., et al., 2000, *Scaling and Development of Low-Swirl Burner for Low Emission Furnaces and Boilers*, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Culp Archie W., 1996, *Prinsip-Prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga.
- Elbe G. V., Lewis B., 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.
- Hizbullah M., 2007, *Pengaruh Variasi Sudut Inklinasi Tangential Air Jet Inlets Terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi Annulus Jet*, Malang: Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Holman, J.P., 1991, *Perpindahan Kalor*, Jakarta: Erlangga.
- Kuo K., 1986, *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons Inc.
- Lee, S., 2006, *Development of Mesoscale Burner Arrays for Gas Turbine Reheat*, London: A Dissertation of Stanford University.
- 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*, Sydney: Department of Mechanical and Mechatronic Engineering University of Sydney.
- 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.
- Nordin N., 2003, *Lecture Notes on Diffusion Combustion*, Gothenburg: Department of Thermo and Fluid Dynamics.
- Peters N., 1997, *Four Lectures on Turbulent Combustion*, Aachen: Ercoftac Summer School.
- Potter C. P., David C. W. dan Midhat Hondzo, 1997, *Mechanics of fluids*, Singapore: Prentice – Hall Inc.
- Halliday R., 1986, *Physics for University*, New York: Mc Graw Hill.

- Tjokrowidjojo, Soetiari., 1986, *Bahan Bakar dan Proses-Proses Kimia Pembakaran*.  
Malang: Universitas Brawijaya.
- Turns Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York: McGraw-Hill Inc.
- Vanoverberghe, K., 2004, *Flow, Turbulence and Combustion of Premixed Swirling Jet  
Flames*, Belgium: Leuven University
- Vujicic M., et al., 2003, *Calculation of The Separation Point for The Turbulent Flow in  
Plane Diffusers*, Belgrade: Faculty of Mechanical Engineering.
- Wahyudi S., 2006, *Statistik Teknik*, Malang: Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas  
Brawijaya.
- Wardana I. N. G., 1995, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Malang: Jurusan  
Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Wijayanti W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Malang: Jurusan Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Willinger Reinhard, 2005, *Influence of Aspect Ratio on Diffuser Performance*, Austria:  
Institut for Thermodynamics and Energy Conversion Vienna University.  
[www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html](http://www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html).



Lampiran 1. Perhitungan massa jenis,  $A/F_{\text{stoikiometri}}$ , HHV dan LHV LPG

LPG terdiri dari 70 % propana dan 30 % *n*-butana.

Persamaan reaksi:



Berikut sifat-sifat pereaksi senyawa pembentuk LPG pada 1 atm dan 27 °C :

Zat	Rumus Kimia	Berat Molekul ( $\text{kg.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )	Massa Jenis ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
Udara		28,97	1,208
Propana	$\text{C}_3\text{H}_8$	44,099	1,887
<i>n</i> -Butana	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	58,126	2,495

Sumber: Culp, 1996: 468

Berikut spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane* :

<i>Properties</i>		<i>Hydrocarbon propane</i>	<i>n-butane</i>
<i>High heating value</i>	( $\text{kcal.kg}^{-1}$ )	12,034	11,832
	( $\text{kcal.m}^{-3}$ )	24,290	31,990
<i>Low heating value</i>	( $\text{kcal.kg}^{-1}$ )	11,079	10,926
	( $\text{kcal.m}^{-3}$ )	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

Berat Molekul bahan bakar =  $MW = 0,7 (44,099) + 0,3 (58,126)$

$$= 48,3071 \text{ kg.kg}^{-1}.\text{kmol}^{-1}$$

$$\text{Massa jenis} = \rho = \frac{P}{R.T} = \frac{P}{R_u.T/(MW)} \quad (\text{Culp,1996: 51})$$

$$= \frac{(1 \text{ atm})(1,0133 \text{ bar.atm}^{-1})}{(0,08315 \text{ bar.m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1})(300 \text{ K})/(48,3071 \text{ kg.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1})}$$

$$= 2,009 \text{ kg.m}^{-3}$$

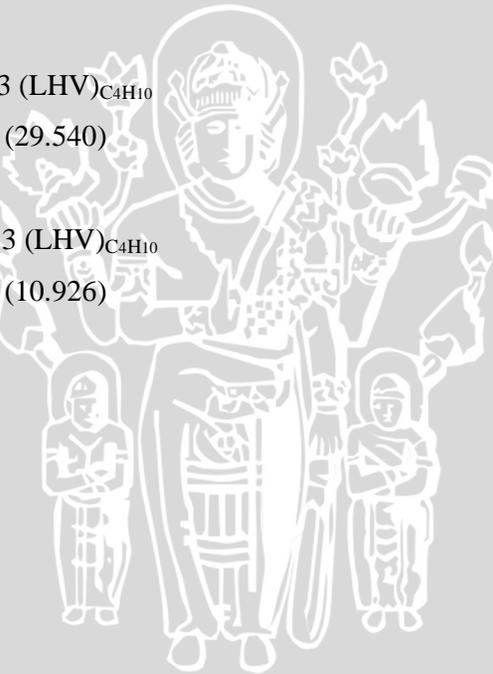
$$\begin{aligned} \frac{A}{F} &= \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \\ &= [(0,7).(15,63) + (0,3).(15,42)] \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}} \\ &= 15,567 \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HHV}_v &= 0,7 (\text{HHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{HHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (24.290) + 0,3 (31.990) \\ &= 26.600 \text{ kcal.m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HHV}_m &= 0,7 (\text{HHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{HHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (12.034) + 0,3 (11.832) \\ &= 11.973,4 \text{ kcal.kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LHV}_v &= 0,7 (\text{LHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{LHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (22.370) + 0,3 (29.540) \\ &= 25.521 \text{ kcal.m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LHV}_m &= 0,7 (\text{LHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{LHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (11.079) + 0,3 (10.926) \\ &= 11.033,1 \text{ kcal.kg}^{-1} \end{aligned}$$



Lampiran 2. data hasil penelitian dengan tanpa pemasangan *divergent quarl*

ΔH Manometer Udara Tangensial (mm Hg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	ΔH Manometer Bahan Bakar		Kecepatan Udara Tangensial (m/s)	Kecepatan Udara Aksial (m/s)	Kecepatan Bahan Bakar				Massa Alir Udara Tangensial (kg/s)	Massa Alir Udara Aksial (kg/s)	Massa Alir Bahan Bakar			
		Lift Off (mmHg)	Blow Off (mmHg)			Lift Off		Blow Off				Lift Off		Blow Off	
						(m/s)	X	(m/s)	X			(kg/s)	X	(kg/s)	X
2	30	12	224	0,824	1,160	3,134		14,748		0,00011249	0,00396065	0,00049425		0,00232586	
		12	228			3,134	3,134	14,843	14,757			0,00049425	0,00049425	0,00234084	0,00232731
		12	220			3,134		14,651				0,00049425		0,00231056	
		12	224			3,134		14,748				0,00049425		0,00232586	
		12	226			3,134		14,796				0,00049425		0,00233343	
		20	326			4,204		16,562				0,00066300		0,00261201	
4	30	22	320	2,265	1,160	4,442		16,486		0,00030933	0,00396065	0,00070053		0,00259995	
		20	318			4,204	4,252	16,460	16,501			0,00066300	0,00067050	0,00259585	0,00260228
		20	326			4,204		16,562				0,00066300		0,00261201	
		20	316			4,204		16,433				0,00066300		0,00259159	
		56	408			7,586		17,300				0,00119636		0,00272832	
		54	416			7,435		17,344				0,00117255		0,00273526	
6	30	56	414	3,784	1,160	7,586	7,526	17,333	17,324	0,00051667	0,00396065	0,00119636	0,00118684	0,00273353	0,00273214
		54	414			7,435		17,333				0,00117255		0,00273353	
		56	410			7,586		17,311				0,00119636		0,00273006	
		110				10,825						0,00170717			
		114				11,016						0,00173729			
		110				10,825	10,882					0,00170717	0,00171623		
10	30	112		5,273	1,160	10,921				0,00072000	0,00396065	0,00172231			
		110				10,825						0,00170717			
		196				14,019						0,00221089			
		194				13,962						0,00220190			
		192				13,904	13,973					0,00219275	0,00220366		
		194				13,962						0,00220190			
196		14,019				0,00221089									



Lampiran 3. data hasil penelitian dengan pemasangan *divergent quarl* 15°

ΔH Manometer Udara Tangensial (mm Hg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	ΔH Manometer Bahan Bakar		Kecepatan Udara Tangensial (m/s)	Kecepatan Udara Aksial (m/s)	Kecepatan Bahan Bakar				Massa Alir Udara Tangensial (kg/s)	Massa Alir Udara Aksial (kg/s)	Massa Alir Bahan Bakar			
		Lift Off (mmHg)	Blow Off (mmHg)			Lift Off		Blow Off				Lift Off (kg/s)	X	Blow Off (kg/s)	X
						(m/s)	X	(m/s)	X						
2	30	20	346	0,824	1,160	4,204		16,793		0,00011249	0,00396065	0,00066300		0,00264837	0,00264767
		22	346			4,442		16,793				0,00070053		0,00264837	
		22	348			4,442	4,347	16,814	16,789			0,00070053	0,00068552	0,00265168	
		20	342			4,204		16,750				0,00066300		0,00264158	
		22	346			4,442		16,793				0,00070053		0,00264837	
4	30	38		2,265	1,160	6,094				0,00030933	0,00396065	0,00096106			0,00097819
		38				6,094						0,00096106			
		40				6,275	6,203					0,00098961			
		40				6,275						0,00098961			
		40				6,275						0,00098961			
6	30	120		3,784	1,160	11,292				0,00051667	0,00396065	0,00178082			0,00180889
		124				11,471						0,00180905			
		126				11,558	11,470					0,00182277			
		124				11,471						0,00180905			
		126				11,558						0,00182277			
8	30	232		5,273	1,160	14,936				0,00072000	0,00396065	0,00235550			0,00234970
		230				14,890						0,00234825			
		230				14,890	14,899					0,00234825			
		230				14,890						0,00234825			
		230				14,890						0,00234825			
10	30	308		6,700	1,160	16,323				0,00091486	0,00396065	0,00257424			0,00257961
		310				16,352						0,00257882			
		312				16,379	16,357					0,00258307			
		312				16,379						0,00258307			
		310				16,352						0,00257882			

Lampiran 4. data hasil penelitian dengan pemasangan *divergent quarl* 30°

ΔH Manometer Udara Tangensial (mm Hg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	ΔH Manometer Bahan Bakar		Kecepatan Udara Tangensial (m/s)	Kecepatan Udara Aksial (m/s)	Kecepatan Bahan Bakar				Massa Alir Udara Tangensial (kg/s)	Massa Alir Udara Aksial (kg/s)	Massa Alir Bahan Bakar			
		Lift Off (mmHg)	Slow Off (mmHg)			Lift Off		Slow Off				Lift Off		Slow Off	
						(m/s)	X	(m/s)	X			(kg/s)	X	(kg/s)	X
2	30	40		0,824	1,160	6,275		6,203		0,00011249	0,00396065	0,00098961	0,00097819		
		40				6,275								0,00098961	
		38				6,094								0,00096106	
		40				6,275								0,00098961	
		38				6,094								0,00096106	
		38				6,094								0,00096106	
4	30	80		2,265	1,160	9,203		9,370		0,00030933	0,00396065	0,00145137	0,00147768		
		84				9,441								0,00148891	
		84				9,441								0,00148891	
		82				9,323								0,00147030	
		84				9,441								0,00148891	
		84				9,441								0,00148891	
6	30	240		3,784	1,160	15,114		15,148		0,00051667	0,00396065	0,00238358	0,00238900		
		242				15,157								0,00239036	
		240				15,114								0,00238358	
		244				15,200								0,00239714	
		242				15,157								0,00239036	
		242				15,157								0,00239036	
8	30	426		5,273	1,160	17,393		17,409		0,00072000	0,00396065	0,00274299	0,00274548		
		430				17,411								0,00274583	
		434				17,427								0,00274835	
		430				17,411								0,00274583	
		430				17,411								0,00274583	
		428				17,402								0,00274441	
10	30			6,700	1,160					0,00091486	0,00396065				

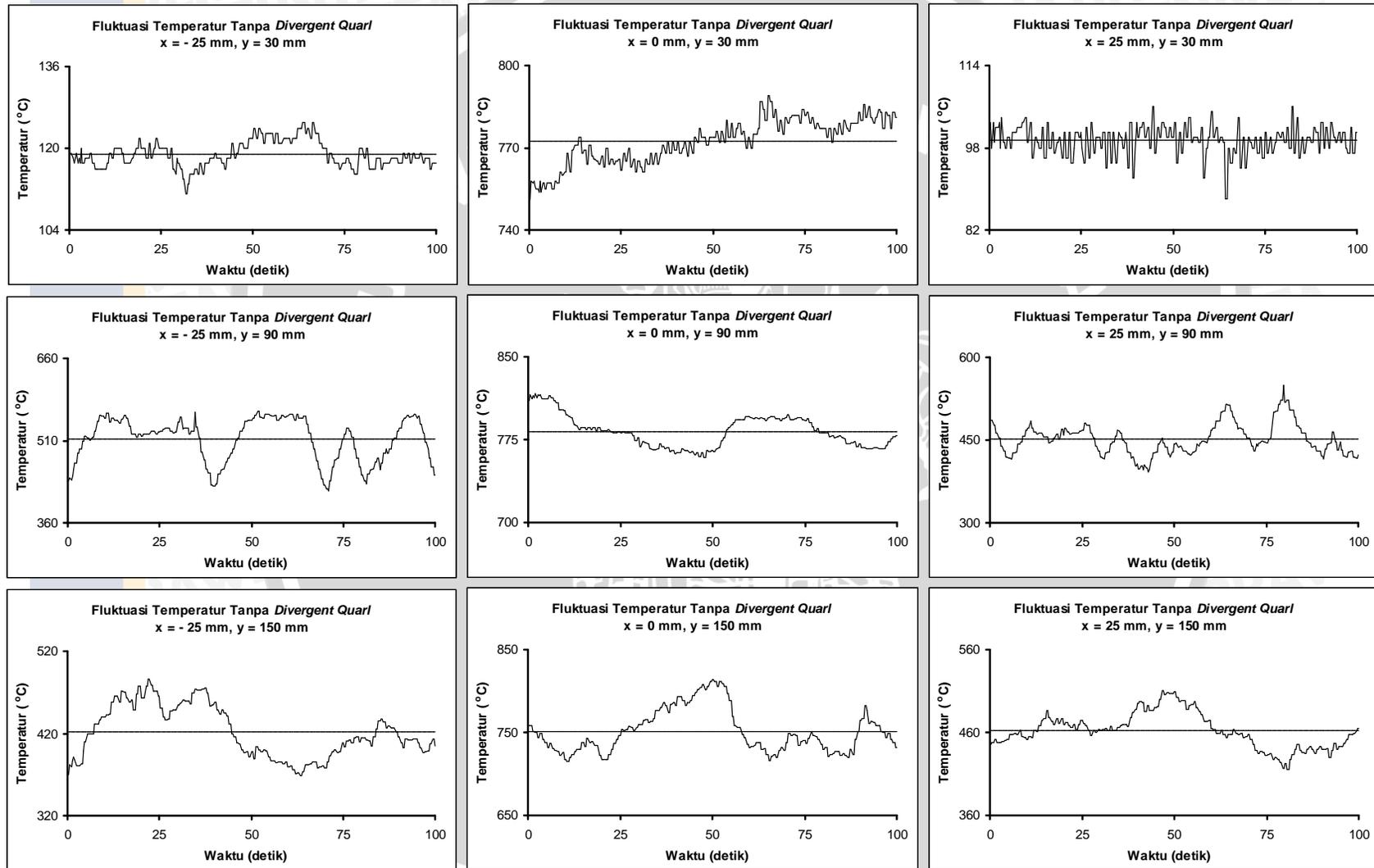
Lampiran 5. data hasil penelitian dengan pemasangan *divergent quarl* 45°

ΔH Manometer Udara Tangensial (mm Hg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	ΔH Manometer Bahan Bakar		Kecepatan Udara Tangensial (m/s)	Kecepatan Udara Aksial (m/s)	Kecepatan Bahan Bakar				Massa Alir Udara Tangensial (kg/s)	Massa Alir Udara Aksial (kg/s)	Massa Alir Bahan Bakar			
		Lift Off (mmHg)	Slow Off (mmHg)			Lift Off		Slow Off				Lift Off		Slow Off	
						(m/s)	X	(m/s)	X			(kg/s)	X	(kg/s)	X
2	30	20		0.824	1.160	4.204		4.299		0.00011249	0.00396065	0.00066300	0.00067801		
		22				4.442						0.00070053			
		22				4.442						0.00070053			
		20				4.204						0.00066300			
		20				4.204						0.00066300			
4	30	56		2.265	1.160	7.586		7.675		0.00030933	0.00396065	0.00119636	0.00121037		
		56				7.586						0.00119636			
		56				7.586						0.00119636			
		58				7.735						0.00121986			
		60				7.881						0.00124288			
6	30	116		3.784	1.160	11.109		11.309		0.00051667	0.00396065	0.00175196	0.00178353		
		120				11.292						0.00178082			
		122				11.382						0.00179502			
		120				11.292						0.00178082			
		124				11.471						0.00180905			
8	30	228		5.273	1.160	14.843		14.796		0.00072000	0.00396065	0.00234084	0.00233336		
		222				14.700						0.00231829			
		228				14.843						0.00234084			
		226				14.796						0.00233343			
		226				14.796						0.00233343			
10	30	316		6.700	1.160	16.433		16.395		0.00091486	0.00396065	0.00259159	0.00258563		
		312				16.379						0.00258307			
		310				16.352						0.00257882			
		310				16.352						0.00257882			
		318				16.460						0.00259585			

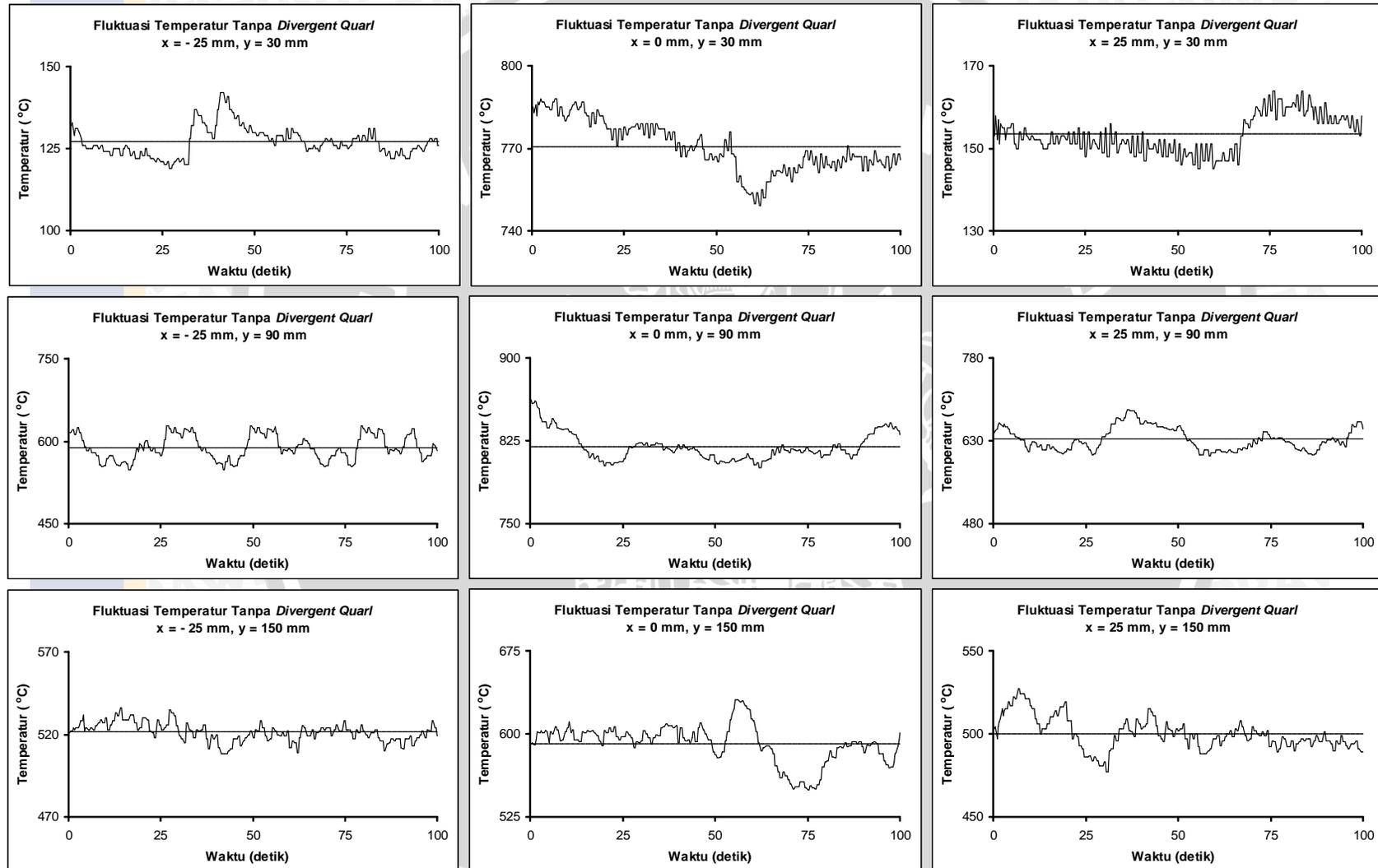
Lampiran 6. data hasil penelitian dengan pemasangan *divergent quarl* 60°

ΔH Manometer Udara Tangensial (mm Hg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	ΔH Manometer Bahan Bakar		Kecepatan Udara Tangensial (m/s)	Kecepatan Udara Aksial (m/s)	Kecepatan Bahan Bakar				Massa Alir Udara Tangensial (kg/s)	Massa Alir Udara Aksial (kg/s)	Massa Alir Bahan Bakar				
		Lift Off (mmHg)	Blow Off (mmHg)			Lift Off		Blow Off				Lift Off		Blow Off		
						(m/s)	X	(m/s)	X			(kg/s)	X	(kg/s)	X	
2	30	14		0,824	1.160	3.423					0,00011249	0,00396065	0,00053983			
		16				3.695				0,00058273						
		16				3.695	3.641			0,00058273			0,00057415			
		16				3.695				0,00058273						
		16				3.695				0,00058273						
4	30	38		2,265	1.160	6.094					0,00030933	0,00396065	0,00096106			
		42				6.452				0,00101752						
		42				6.452	6.273			0,00101752			0,00098936			
		40				6.275				0,00098961						
		38				6.094				0,00096106						
6	30	100		3,784	1.160	10.324					0,00051667	0,00396065	0,00162816			
		106				10.629				0,00167626						
		106				10.629	10.508			0,00167626			0,00165712			
		102				10.427				0,00164441						
		104				10.529				0,00166049						
8	30	196		5,273	1.160	14.019					0,00072000	0,00396065	0,00221089			
		190				13.846				0,00218360						
		186				13.727	13.857			0,00216484			0,00218531			
		190				13.846				0,00218360						
		190				13.846				0,00218360						
10	30	256		6,700	1.160	15.447					0,00091486	0,00396065	0,00243609			
		250				15.326				0,00241701						
		248				15.284	15.374			0,00241039			0,00242455			
		250				15.326				0,00241701						
		258				15.486				0,00244224						

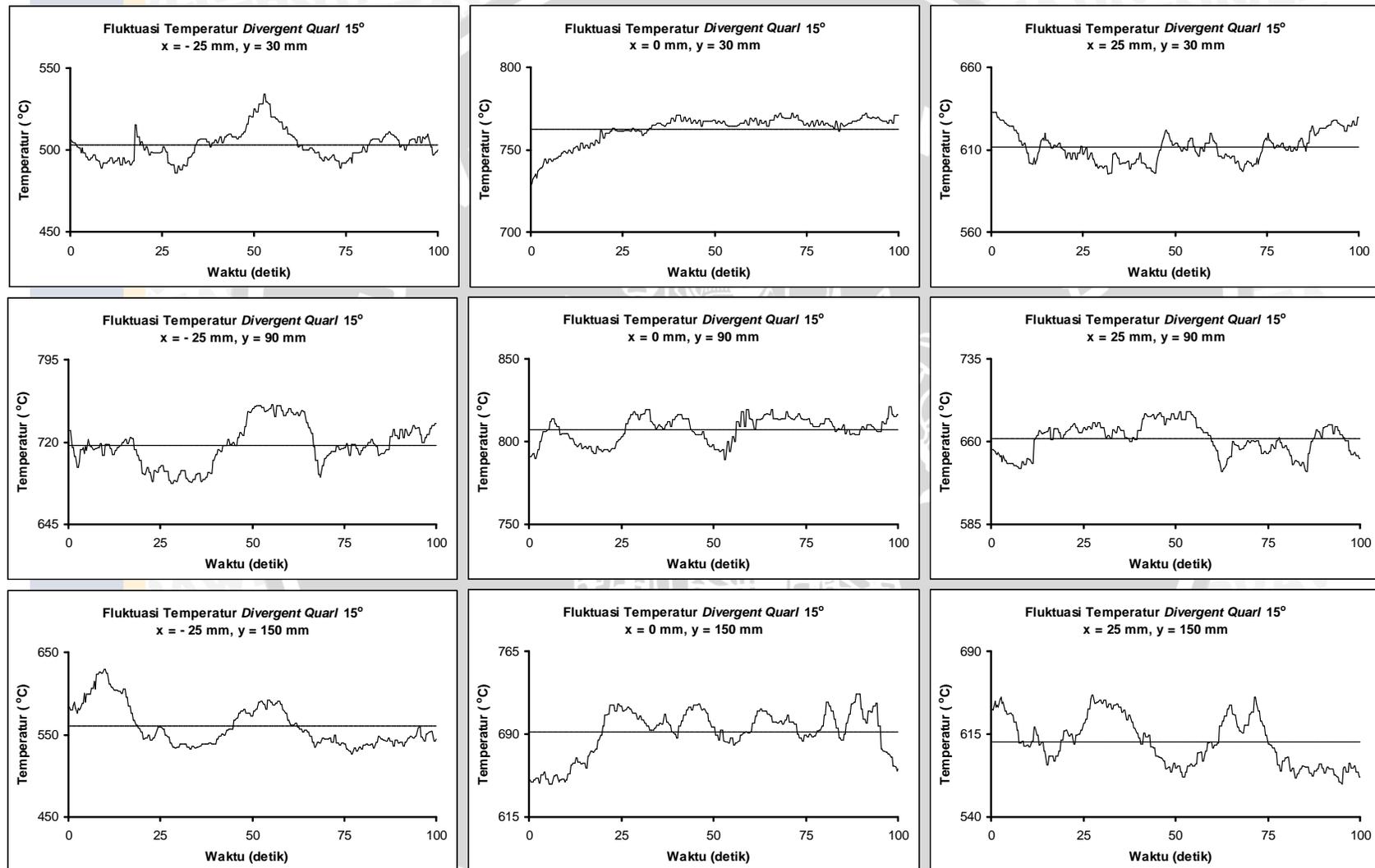
Lampiran 7. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan tanpa pemasangan *divergent quarl* pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



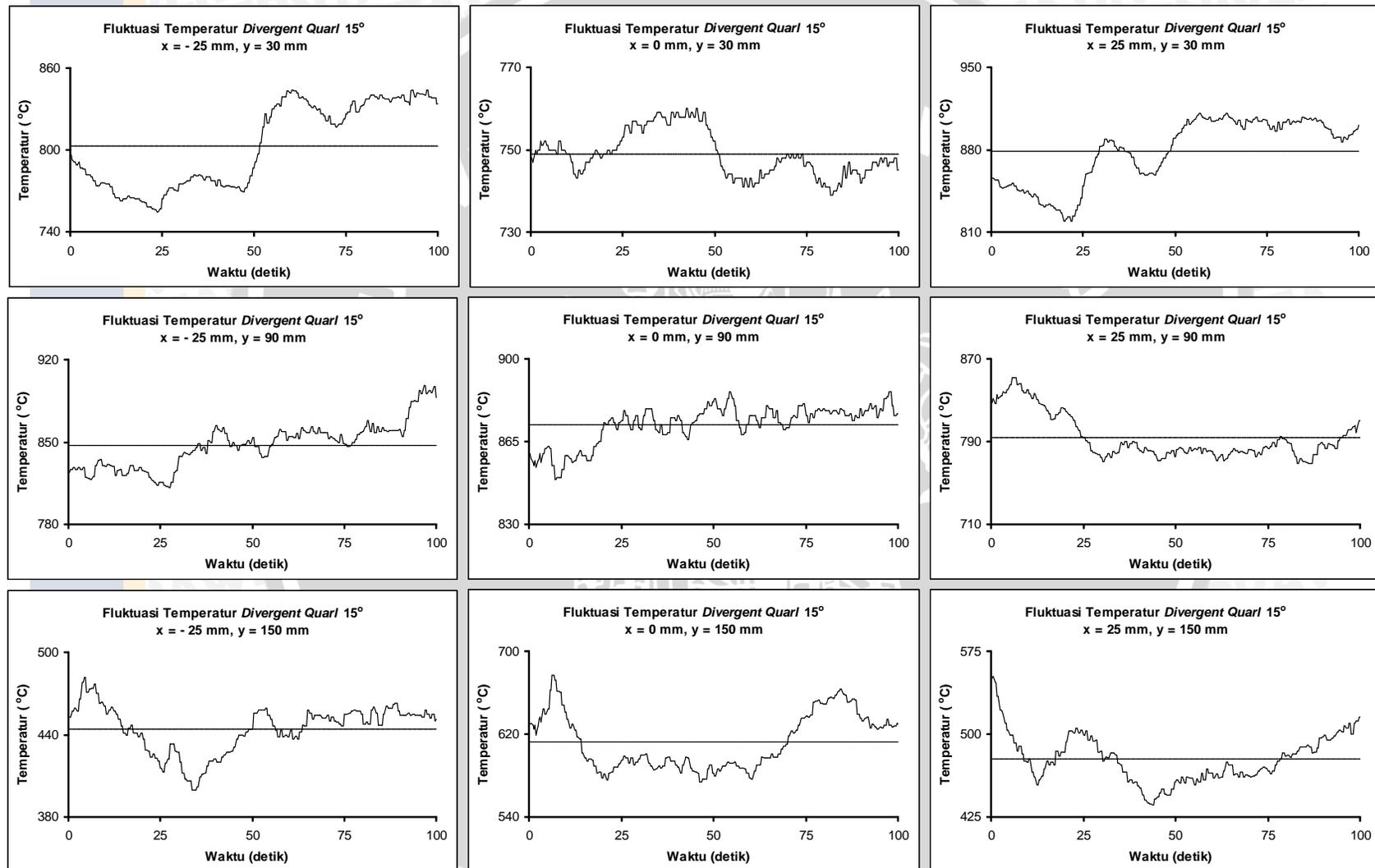
Lampiran 8. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan tanpa pemasangan *divergent quarl* pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



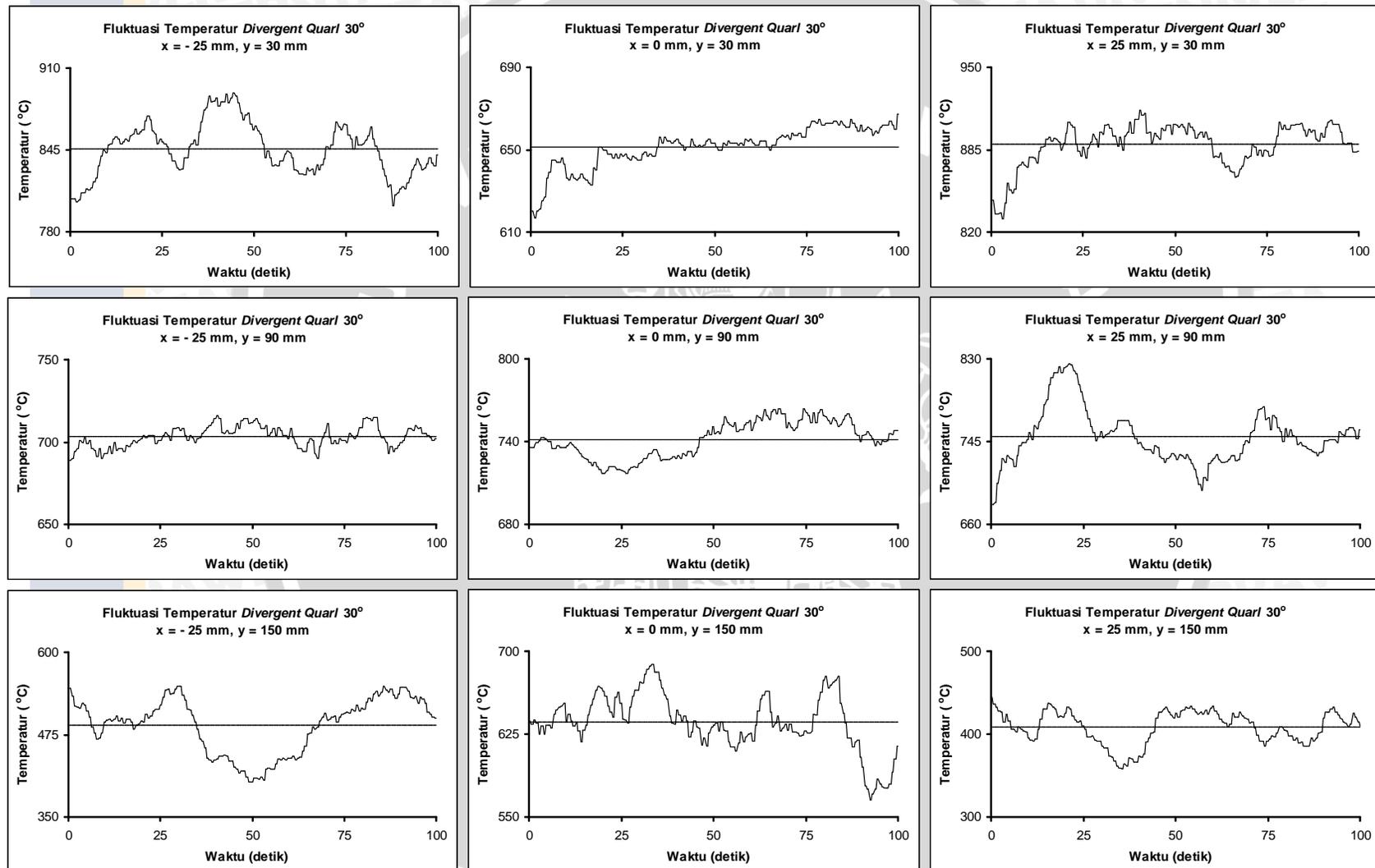
Lampiran 9. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl*  $15^\circ$  pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



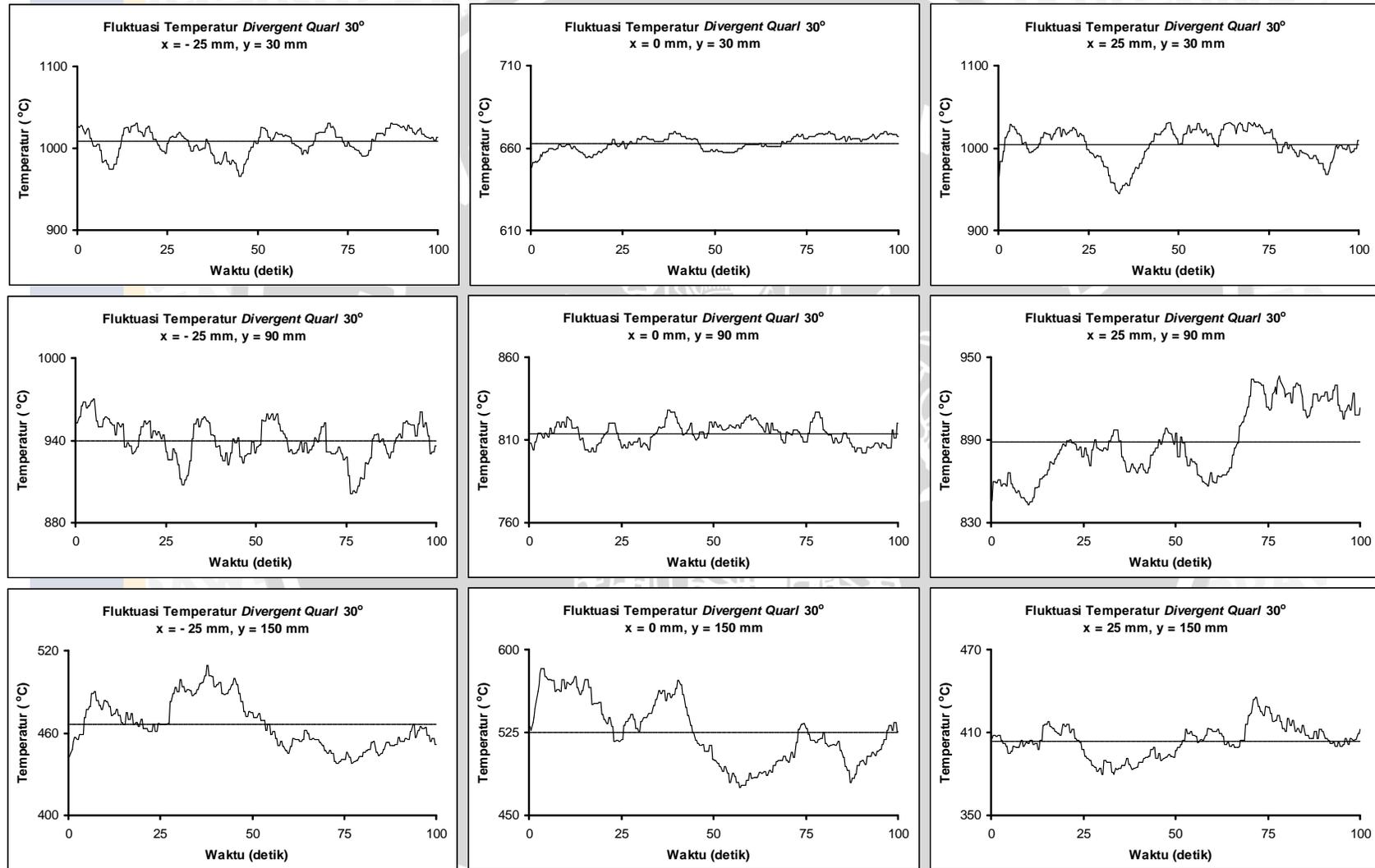
Lampiran 10. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl* 15° pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



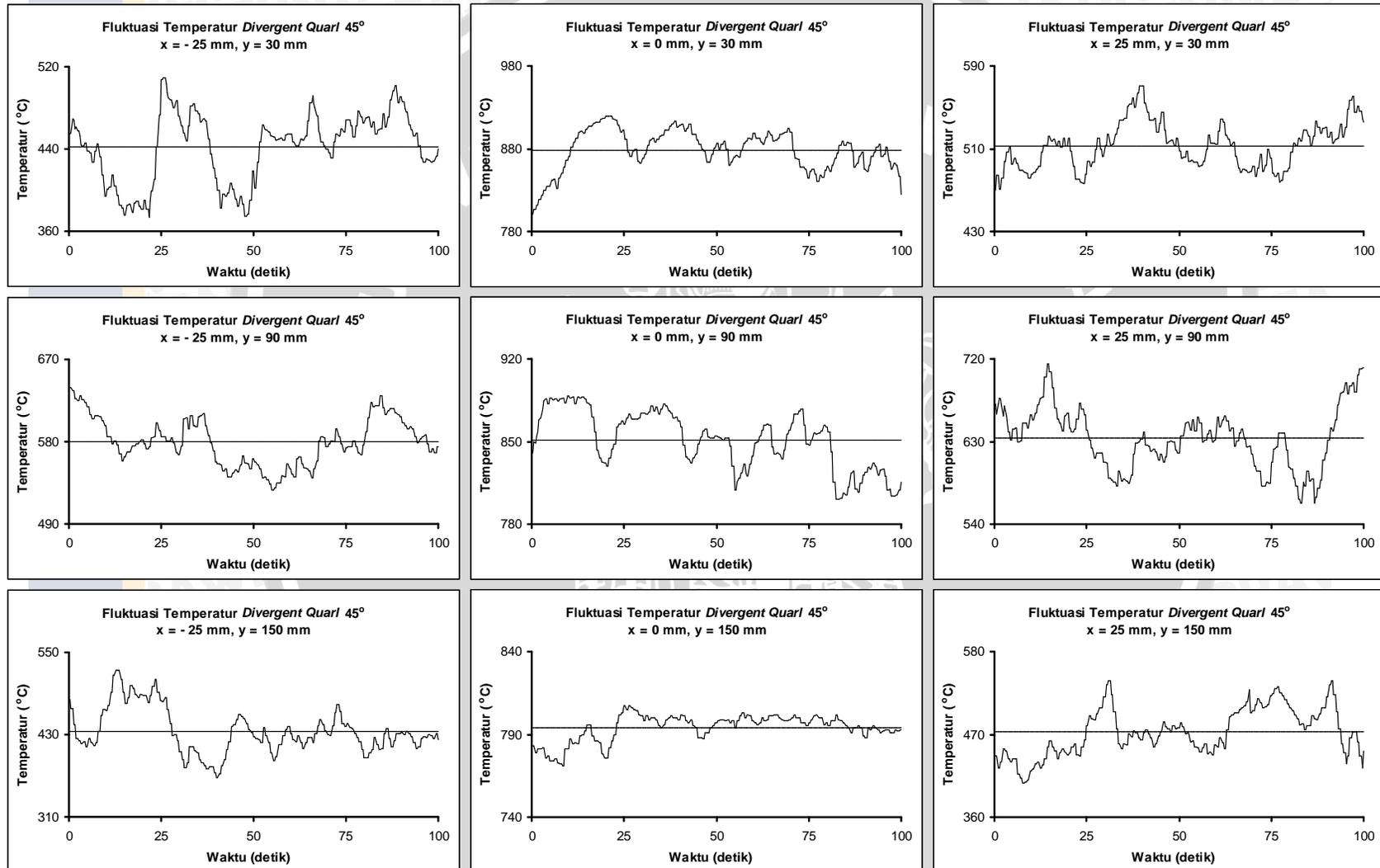
Lampiran 11. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl* 30° pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



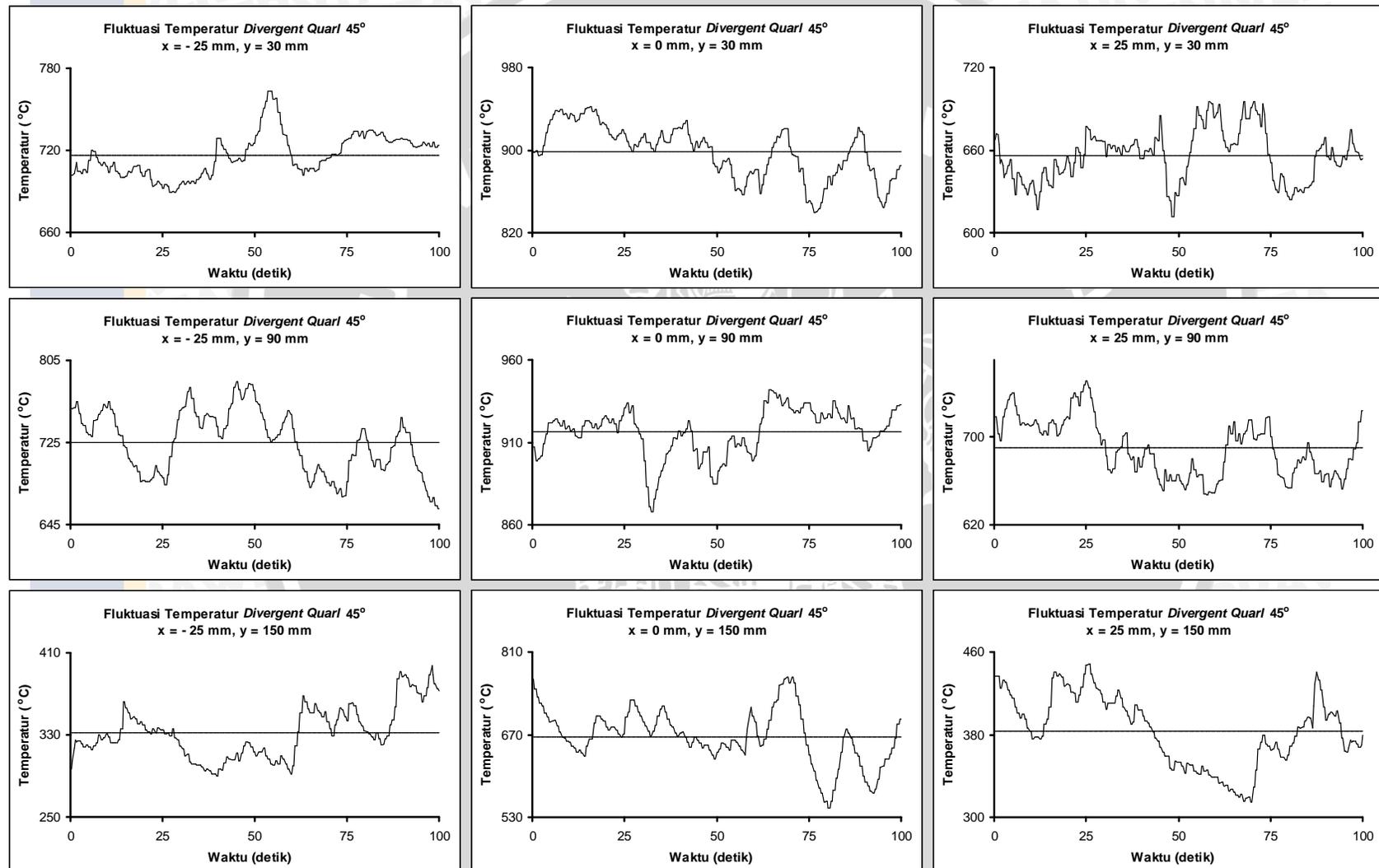
Lampiran 12. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl 30°* pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



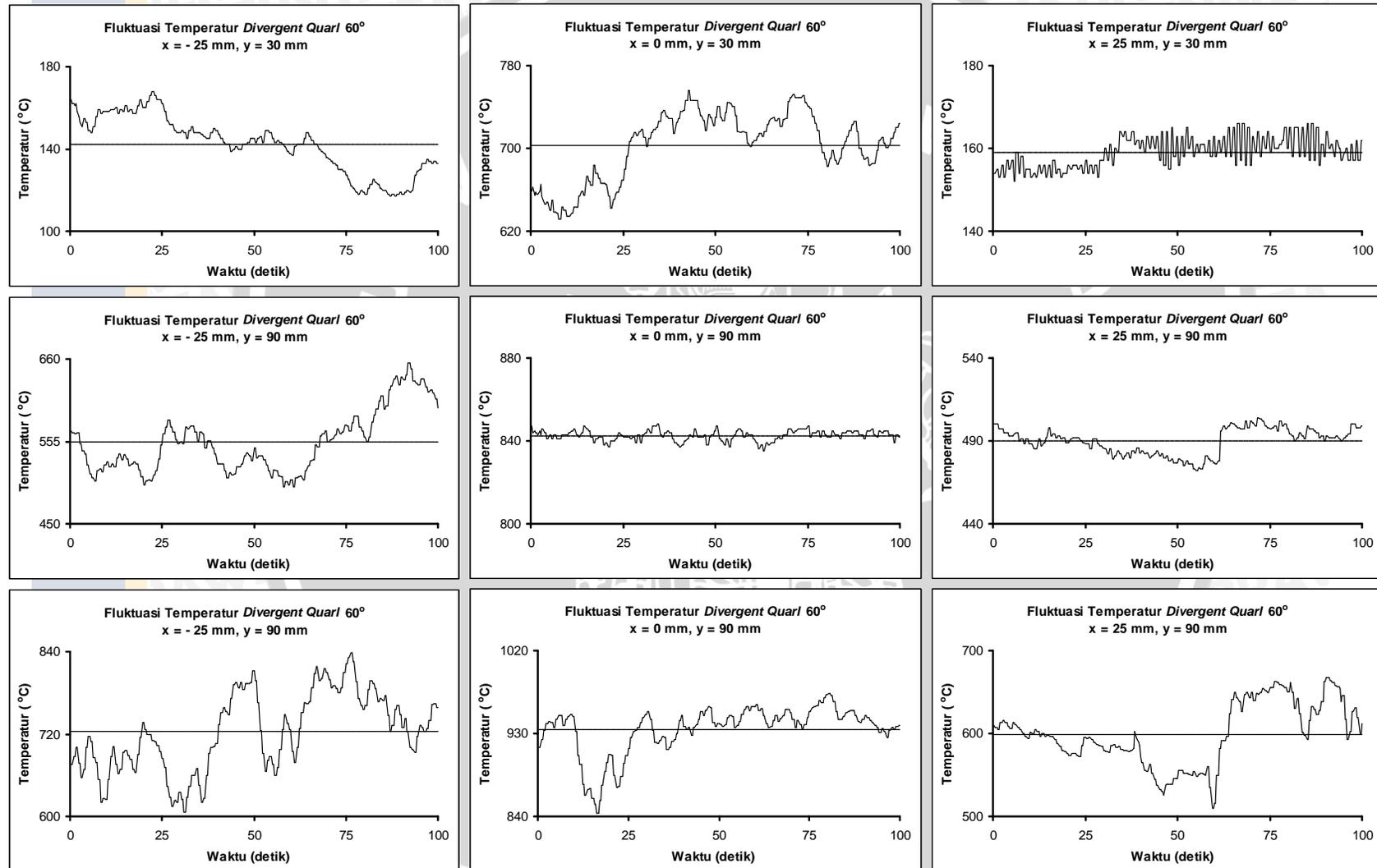
Lampiran 13. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl 45°* pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



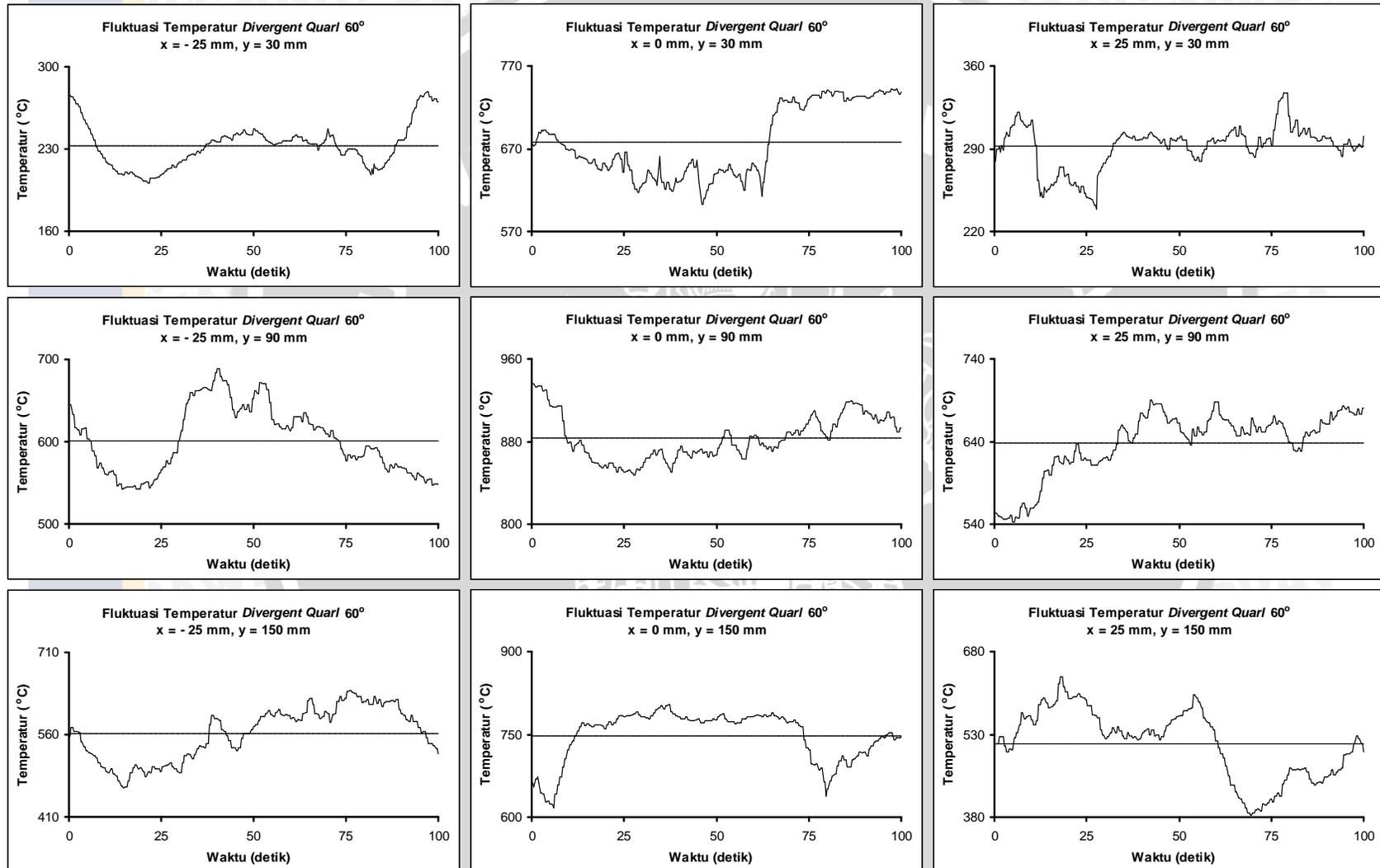
Lampiran 14. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl 45°* pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 15. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl* 60° pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



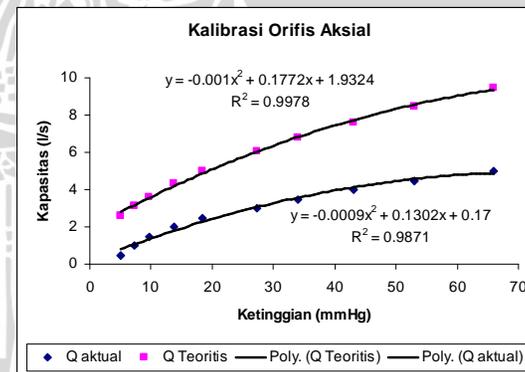
Lampiran 16. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *divergent quarl* 60° pada  $y = 30$  mm,  $y = 90$  mm dan  $y = 150$  mm  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



## Lampiran 17. Harga faktor koreksi C untuk orifis udara aksial

$\Delta H$	V orifis (m/s)	V saluran (m/s)	P	X	$\rho$ Udara (Kg/m <sup>3</sup> )	g (m/s <sup>2</sup> )	$\rho$ Minyak (Kg/m <sup>3</sup> )	$\beta$	$\beta^2$	$\beta^4$	A saluran	Q aktual(l/s)	Q aktual(m <sup>3</sup> /s)
5	8,285940116	0,920660013	40,95675	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	0,5	0,0005
7,3333333	10,03477181	1,114974646	60,0699	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	1	0,001
9,6666667	11,52113219	1,280125799	79,18305	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	1,5	0,0015
13,666667	13,6989755	1,522108389	111,94845	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	2	0,002
18,333333	15,86636736	1,762929707	150,17475	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	2,5	0,0025
27,333333	19,37327695	2,152586328	223,8969	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	3	0,003
34	21,60708829	2,400787588	278,5059	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	3,5	0,0035
43	24,2991463	2,699905145	352,22805	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	4	0,004
53	26,97706652	2,997451836	434,14155	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	4,5	0,0045
66	30,10431543	3,344923937	540,6291	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	5	0,005
30	20,29632532	2,255147258	245,7405	1,19308642	1,208	9,81	835	0,33333	0,11111	0,01235	0,002826	5,5	0,0055

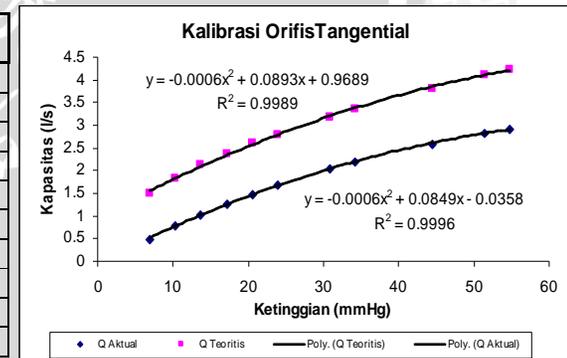
Q teori (l/s)	Q teori (m <sup>3</sup> /s)	Q Aktual Pers	Q Teoritis pers	C	V aktual	masa alir (kg/s)
2,6017852	0,002601785	0,0007985	0,0027934	0,28585	0,263173	0,000898422
3,1509183	0,003150918	0,0010764	0,003178089	0,33869	0,377635	0,001289175
3,6176355	0,003617636	0,0013445	0,003551889	0,37853	0,484567	0,00165422
4,3014783	0,004301478	0,0017813	0,004167356	0,42744	0,650612	0,002221065
4,9820394	0,004982039	0,0022545	0,004844956	0,46533	0,820343	0,002800493
6,083209	0,006083209	0,0030564	0,006028756	0,50697	1,091297	0,00372548
6,7846257	0,006784626	0,0035564	0,0068012	0,52291	1,25539	0,004285662
7,6299319	0,007629932	0,0041045	0,007703	0,53284	1,438629	0,004911204
8,4707989	0,008470799	0,0045425	0,008515	0,53347	1,599052	0,005458855
9,452755	0,009452755	0,0048428	0,0092716	0,52233	1,747142	0,005964406
6,3730462	0,006373046	0,003266	0,0063484	0,51446	1,160184	0,003960645



Lampiran 18. Harga faktor koreksi C untuk orifis udara tangensial

ΔH	V orifis (m/s)	V saluran (m/s)	P	X	ρ Udara (Kg/m3)	g (m/s2)	ρ Hg (Kg/m3)	β	β <sup>2</sup>	β <sup>4</sup>	A saluran	A jet
1	14,89498591	0,986502905	133,416	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
2	21,06469108	1,395125788	266,832	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
3	25,79887237	1,708673154	400,248	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
4	29,78997182	1,973005811	533,664	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
5	33,30620101	2,205887556	667,08	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
6	36,4851152	2,416428748	800,496	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
7	39,40842849	2,610041355	933,912	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
8	42,12938217	2,790251576	1067,328	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
9	44,68495772	2,959508716	1200,744	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065
10	47,10208119	3,119596099	1334,16	1,2027011	1,208	9,81	13600	0,2573529	0,0662305	0,0043865	0,0005808	0,000007065

persm q akt	persm q teori	C	V Aktual	A jet total	V jet total (m/s)	V jet (m/s)	masa alir (kg/s)
0,0000485	0,0010576	0,045858548	0,04523959	0,00002826	0,929723851	0,232430963	0,00003173899
0,0001316	0,0011451	0,114924461	0,160334079	0,00002826	3,29504347	0,823760867	0,00011248646
0,0002135	0,0012314	0,173379893	0,296249568	0,00002826	6,088257794	1,522064448	0,00020784143
0,0002942	0,0013165	0,223471325	0,440910224	0,00002826	9,061194997	2,265298749	0,00030933180
0,0003737	0,0014004	0,266852328	0,58864623	0,00002826	12,09733407	3,024333517	0,00041297976
0,000452	0,0014831	0,304767042	0,736447842	0,00002826	15,13482142	3,783705356	0,00051667374
0,0005291	0,0015646	0,3381695	0,882636381	0,00002826	18,13915833	4,534789582	0,00061923604
0,000605	0,0016449	0,367803514	1,026264334	0,00002826	21,09087236	5,272718091	0,00072000189
0,0006797	0,001724	0,394257541	1,166808628	0,00002826	23,97921375	5,994803439	0,00081860432
0,0007532	0,0018019	0,418003219	1,304001211	0,00002826	26,79867377	6,699668444	0,00091485527



Lampiran 19. Harga faktor koreksi C untuk orifis bahan bakar

ΔH (mm)	V orifis (m/s)	V saluran (m/s)	P	X	ρ bb (Kg/m3)	g (m/s2)	ρ Hg (Kg/m3)	β	β <sup>2</sup>	β <sup>4</sup>	A saluran	A Nozzle	Q aktual(l/s)	Q aktual(m3/s)
6	28,59802	4,57568	800,496	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	0,25	0,00025
42	75,66325	12,10612	5603,472	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	0,5	0,0005
80	104,42521	16,70803	10673,280	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	0,75	0,00075
126	131,05259	20,96842	16810,416	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	1	0,001
162	148,59967	23,77595	21613,392	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	1,25	0,00125
208	168,38059	26,94089	27750,528	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	1,5	0,0015
260	188,25522	30,12083	34688,160	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	1,75	0,00175
320	208,85041	33,41607	42693,120	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	2	0,002
386	229,37918	36,70067	51498,576	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	2,25	0,00225
460	250,40285	40,06446	61371,360	1,95757	2,009	9,81	13600	0,4	0,16	0,0256	0,0000785	0,00000314	2,5	0,0025

Q teori(l/s)	Q teori(m3/s)	Q Aktual Persm	Q Teoritis persm	C	V bb
0,3591911	0,000359191	0,00024862	0,000534146	0,4654533	3,167133758
0,9503304	0,00095033	0,00049558	0,000929822	0,5329837	6,313121019
1,3115806	0,001311581	0,0007422	0,00134748	0,5508059	9,45477707
1,6460206	0,001646021	0,00102142	0,001853066	0,5512054	13,01171975
1,8664119	0,001866412	0,00122518	0,002248742	0,5448291	15,60738854
2,1148602	0,00211486	0,00146668	0,002754328	0,5325001	18,68382166
2,3644855	0,002364486	0,0017142	0,00332586	0,5154156	21,83694268
2,6231612	0,002623161	0,0019662	0,00398532	0,4933606	25,04713376
2,8810025	0,002881003	0,00220182	0,004710726	0,4674057	28,04866242
3,1450598	0,00314506	0,0024142	0,00552406	0,4370336	30,75414013

