

repository.ub.ac.id

**PENGARUH DIAMETER *CONICAL BLUFF BODY*  
TERHADAP KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI  
TEMPERATUR API DIFUSI *ANNULUS JET***

**SKRIPSI**

**Konsentrasi Teknik Konversi Energi**  
Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Disusun Oleh :**

**RIRIN WIDYA ASTUTI**  
**NIM. 0210620112**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**JURUSAN MESIN**

**MALANG**

**2007**



repository.ub.ac.id

**PENGARUH DIAMETER *CONICAL BLUFF BODY*  
TERHADAP KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI  
TEMPERATUR API DIFUSI *ANNULUS JET***

**SKRIPSI**

**Konsentrasi Teknik Konversi Energi**  
Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**Disusun Oleh :**

**RIRIN WIDYA ASTUTI**  
**NIM. 0210620112**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

**DOSEN PEMBIMBING I**

**DOSEN PEMBIMBING II**

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

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

**PENGARUH DIAMETER *CONICAL BLUFF BODY* TERHADAP  
KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR  
API DIFUSI *ANNULUS JET***

Disusun oleh:

**Ririn Widya Astuti**

**0210620112-62**

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

Dosen Penguji

**Skripsi 1**

**Skripsi 2**

**Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT.**

**NIP. 130 935 863**

**Ir. Handono Sasmito M.Eng.Sc**

**NIP. 131 411 121**

**Komprehensif**

**Ir. I Made Gunadiarta, MT.**

**NIP. 130 604 495**

**Mengetahui:**

**Ketua Jurusan Teknik Mesin**

**Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT**

**NIP. 132 159 708**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul **“Pengaruh Diameter Conical Bluff Body Terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Api Difusi Annulus Jet”** dapat terselesaikan.

Penulis 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 dan Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penyusun dalam menyusun skripsi ini.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono. M.Sc.CSE, selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng., Sc., selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Mesin.
4. Bapak Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak membimbing dan meluangkan waktunya untuk berdiskusi.
5. Bapak Ir. I Made Gunadiarta MT., selaku Ketua Laboratorium Mesin Pendingin yang telah banyak memberikan fasilitas dan bimbingan baik dalam perkuliahan maupun dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Ibu Lilis Yulianti, ST., MT., dan Bapak Sofyan Arief Setyabudi, ST. yang telah banyak memberikan masukan, saran dan dorongan dalam menyusun skripsi ini.
7. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M. Eng., yang telah banyak memberikan saran dan meluangkan waktunya untuk berdiskusi.
8. Seluruh Pengajar dan Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
9. Rekan-rekan mahasiswa angkatan 2002 serta semua pihak yang telah memberikan dorongan, semangat serta doa dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Juli 2007

Penyusun.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK</b> .....	vi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1. Pembakaran .....	5
2.2. Pembakaran Sempurna .....	6
2.3. Penyalaan dan Batas Ketidaknyaalaan ( <i>Limit of Inflammability</i> ) .....	8
2.4. Pembakaran Difusi .....	9
2.5. Aliran Turbulen .....	11
2.6. Kastabilan Api .....	14
2.7. <i>Bluff Body Recirculation</i> .....	15
2.8. Aliran Udara Tangensial .....	17
2.9. Distribusi Kecepatan Dalam aliran Berpusar .....	17
2.10. LPG ( <i>Liquified Petroleum Gas</i> ) .....	19
2.11. Hipotesis .....	20
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	21
3.1. Metode Penelitian .....	21
3.2. Variabel yang Diukur .....	21
3.3. Alat-alat yang Digunakan .....	22



3.4. Instalasi Penelitian .....	25
3.5. Metode Pengambilan Data.....	25
3.6. Rancangan Pengolahan Data .....	26
3.7. Diagram Alir Penulisan .....	27
<b>BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>28</b>
4.1. Hasil Penelitian .....	28
4.2. Kestabilan Nyala Api Difusi <i>Annulus Jet</i> .....	28
4.2.1. Data Penelitian.....	28
4.2.2. Perhitungan Data.....	28
4.2.3. Grafik Kestabilan Api.....	30
4.3. Distribusi Temperatur Api Difusi <i>Annulus Jet</i> .....	32
4.3.1. Data Penelitian.....	32
4.3.2. Pengukuran Temperatur.....	32
4.3.3. Grafik Distribusi Temperatur dengan Berbagai Variasi Diameter <i>Conical Bluff Body</i> pada Arah Aksial.....	33
4.3.4. Grafik Distribusi Temperatur dengan Variasi Diameter <i>Conical         Bluff Body</i> .....	36
4.4. Visualisasi Api Difusi <i>Annulus Jet</i> .....	38
4.5. Fluktuasi Temperatur Api Difusi <i>Annulus Jet</i> .....	41
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>45</b>
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran .....	45
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Difusi komponen A ke dalam komponen B	8
Gambar 2.2	Perubahan aliran dan struktur api	9
Gambar 2.3	Fluktuasi kecepatan rata-rata	11
Gambar 2.4	Efek <i>scale of turbulence</i> pada permukaan nyala	12
Gambar 2.5	Gambar <i>Distributed Reaction zone</i>	12
Gambar 2.6	Reaksi yang Terjadi pada Api	13
Gambar 2.7	Skema <i>Lift Off</i> pada Api Difusi <i>Jet</i>	14
Gambar 2.8	Bentuk <i>Bluff Body</i>	15
Gambar 2.9	<i>Downstream of Obstruction</i>	15
Gambar 2.10	Diagram <i>burner</i> dengan udara berputar menggunakan <i>tangential air</i>	17
Gambar 3.1	Skema <i>Annulus</i>	22
Gambar 3.2	Skema <i>Conical Bluff Body</i>	23
Gambar 3.3	Skema Instalasi Penelitian	25
Gambar 3.4	Distribusi Temperatur api Difusi <i>Annulus Jet</i>	26
Gambar 3.5	Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 4.1	Grafik kestabilan api difusi <i>annulus jet</i> pada berbagai kondisi	31
Gambar 4.2	Grafik distribusi temperatur dengan variasi diameter <i>conical bluff body</i> $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	34
Gambar 4.3	Grafik distribusi temperatur dengan variasi diameter <i>conical bluff body</i> $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	36
Gambar 4.4	Grafik distribusi temperatur pada arah aksial dengan $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	37
Gambar 4.5	Grafik distribusi temperatur pada arah aksial dengan $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	38
Gambar 4.6	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>conical bluff body</i> . $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	39
Gambar 4.7	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>conical bluff body</i> . $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , dan $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$	40
Gambar 4.8	Visualisasi api <i>lift off</i> pada berbagai variasi diameter <i>conical bluff body</i> dengan $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ , $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ dan $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$	41

Gambar 4.9 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi diameter *conical bluff body* dengan  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$ , dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  42

Gambar 4.10 Fluktuasi temperatur  $Y = 50 \text{ mm}$ ,  $Y = 100 \text{ mm}$  dan  $Y = 150 \text{ mm}$ .  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$ , dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  43

Gambar 4.11 Fluktuasi temperatur  $Y = 50 \text{ mm}$ ,  $Y = 100 \text{ mm}$  dan  $Y = 150 \text{ mm}$ .  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$ , dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  44





## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi udara kering	6
Tabel 2.2	Spesifikasi untuk <i>commercial propane</i> dan <i>n-butane</i>	20



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Perhitungan HHV dan LHV LPG
Lampiran 2	Data hasil penelitian dengan tanpa <i>conical bluff body</i>
Lampiran 3	Data hasil penelitian dengan <i>conical bluff body</i> 20 mm
Lampiran 4	Data hasil penelitian dengan <i>conical bluff body</i> 30 mm
Lampiran 5	Data hasil penelitian dengan <i>conical bluff body</i> 40 mm
Lampiran 6	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan tanpa pemasangan <i>conical bluff body</i> pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm, $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 2,265$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 7	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan tanpa pemasangan <i>conical bluff body</i> pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm, $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 5,273$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 8	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 20 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 2,265$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 9	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 20 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 5,273$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 10	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 30 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 2,265$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 11	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 30 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 5,273$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 12	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 40 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 2,265$ m.s <sup>-1</sup>
Lampiran 13	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>conical bluff body</i> 40 mm pada $Y = 50$ mm, $Y = 100$ mm dan $Y = 150$ mm. $V = 5,318$ m.s <sup>-1</sup> , $U = 1,0581$ m.s <sup>-1</sup> dan $W = 5,273$ m.s <sup>-1</sup>

## RINGKASAN

**Ririn Widya Astuti**, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2007, **Pengaruh Diameter *Conical Bluff Body* 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. Kestabilan pembakaran merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam proses pembakaran, ketidakstabilan pembakaran seringkali terjadi akibat adanya perubahan konsumsi jumlah bahan bakar disesuaikan dengan jumlah kalor yang diperlukan. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya untuk memperbaiki unjuk kerja dari proses pembakaran difusi. Salah satu metode yang digunakan adalah menghasilkan daerah resirkulasi dengan pemasangan *conical bluff body* pada aliran udara pembakaran. *Conical bluff body* akan membentuk suatu olakan pada aliran udara sehingga akan membentuk daerah resirkulasi, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara semakin homogen, akibatnya akan diperoleh pembakaran yang lebih sempurna dan kestabilan api yang lebih baik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *conical bluff body* 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 tangensial. Variabel bebas yang digunakan adalah variasi diameter *conical bluff body*, yaitu 20, 30, 40 mm dan tanpa pemasangan *conical bluff body*, kecepatan aliran udara aksial konstan pada  $1,0581 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ , kecepatan udara tangensial divariasikan dari  $1 \div 20 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$  dan kecepatan aliran bahan bakar juga divariasikan antara  $1 \div 20 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ . 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 dilakukan pada kecepatan aliran bahan bakar konstan yaitu  $5,273$  dan  $2,265 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ .

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar diameter *conical bluff body* yang dipasang pada *annulus* udara mengakibatkan kestabilan nyala pada api difusi *annulus jet* semakin meningkat dan distribusi temperatur semakin terdistribusi secara merata ke arah horisontal. Daerah kestabilan api difusi terbesar dan distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling baik diperoleh pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 40 mm pada kecepatan aliran bahan bakar konstan yaitu  $5,273 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ . Dari data temperatur juga didapatkan hasil bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada pangkal api.

*Keywords:* *conical bluff body*, kestabilan nyala api, distribusi temperatur, difusi.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kestabilan pembakaran memegang peranan yang sangat penting dalam proses pembakaran. Dalam perindustrian seringkali terjadi perubahan konsumsi jumlah bahan bakar, hal ini disesuaikan dengan jumlah kalor yang diperlukan. Perubahan konsumsi bahan bakar mengakibatkan adanya perubahan kecepatan bahan bakar yang akan mempengaruhi perubahan kecepatan pembakaran. Bila kecepatan bahan bakar dan udara semakin besar, sementara kecepatan pembakarannya rendah maka akan terjadi *lift off* dan bahkan akan terjadi *blow off* (api padam), kedua peristiwa tersebut akan mempengaruhi kestabilan pembakaran. Selain itu dapat pula ditunjukkan dengan intensitas fluktuasi temperatur yang relatif rendah, jika temperatur pembakaran mengalami fluktuasi yang tinggi maka akan berpengaruh pada panas yang dihasilkan dari proses pembakaran. Hal ini juga sangat berpengaruh pada konstruksi dari ruang bakar. *Mixing* antara bahan bakar dan udara akan menghasilkan campuran yang lebih homogen bila aliran udara pembakaran bercampur lebih merata dengan bahan bakar. Pola aliran udara pembakaran seperti ini dapat diperoleh dengan menggunakan *bluff body* untuk membuat olakan dalam aliran udara pembakaran sehingga diharapkan dapat membuat campuran bahan bakar dan udara pembakaran menjadi lebih homogen. *Bluff body* merupakan suatu obyek penghalang yang diletakkan pada ujung aliran sehingga mampu membuat suatu olakan di belakang benda tersebut.

Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dengan mengganggu kestabilan struktur aliran udara, karena dengan terganggunya kestabilan aliran dari fluida tersebut dapat membantu terbentuknya turbulensi. Turbulensi sangat diperlukan pada suatu proses pencampuran bahan bakar dan udara pada ruang bakar untuk menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, karena turbulensi dapat meningkatkan kemampuan transfer panas dari suatu elemen fluida, serta mempunyai difusifitas yang besar. Pada dasarnya turbulensi dapat dibangkitkan dengan berbagai cara. Diantaranya adalah penambahan *tangential air jet inlets*, *swirling vanes* maupun *bluff body* yang mengakibatkan aliran udara menjadi turbulen.

Hizbullah, Malik (2007), telah melakukan penelitian tentang *pengaruh variasi sudut inklinasi tangential air jet inlets terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi annulus jet*. Hasilnya menunjukkan 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.

Raman V. (2005) melakukan penelitian mengenai pengaruh kecepatan aliran udara terhadap kestabilan api pembakaran difusi. Kecepatan aliran udara sangat berpengaruh terhadap luasan zona resirkulasi, di mana semakin cepat aliran udara menyebabkan zona resirkulasi mengalami penurunan luasan. Hal itu disebabkan karena kecepatan aliran udara yang besar menyebabkan timbulnya suatu kondisi *chaos* yang menyebabkan terjadinya fenomena terjadinya pusaran. Dengan adanya fenomena tersebut, maka akan terjadi penurunan tekanan di berbagai sisi *bluff body*. Sehingga terjadi berbagai perubahan tekanan dan temperatur yang mampu dibangkitkan oleh penyala.

Bahawan J. (2002) melakukan penelitian tentang pengaruh dimensi *disc bluff body* terhadap waktu penyalaan pada awal pembakaran. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa semakin besar dimensi dari *bluff body*, maka akan terjadi potensial tekanan yang akan semakin besar. Semakin besar dimensi *bluff body* menyebabkan pusaran *vortex* yang besar.

Sudjana A. (2001) melakukan penelitian mengenai pengaruh kecepatan udara terhadap awal terjadinya proses pembakaran. Turbulensi dibangkitkan dengan memasang *bluff body* dengan model *disc* atau cakram. Sehingga aliran udara akan timbul pusaran atau *vortex* di sekitar *bluff body*. Tempat terjadinya pusaran terbesar menjadi tempat terbaik bagi terjadinya difusi dua fluida. Semakin dekat *bluff body* dengan mulut nosel sampai jarak tertentu maka pencampurannya akan semakin baik. Kesimpulan yang didapat yaitu kecepatan udara mempengaruhi penyalaan, kondisi tersulit ialah jika kecepatan udara sama dengan kecepatan bahan bakar yang ditandai dengan waktu penyalaan yang sama, walaupun digunakan jumlah udara dan bahan bakar yang cukup.

Masri, A. R. (2000), telah melakukan penelitian tentang *strongly swirling nonpremixed flame stabilized on new burner*. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa kestabilan nyala api terjadi akibat adanya aliran *swirl* dan *bluff body* yang menghasilkan

gradien tekanan melawan arah aliran dan menyebabkan lapisan geser pada arah aksial dan tangensial, hal ini akan mengakibatkan adanya zona resirkulasi yang membawa kembali produk panas hasil pembakaran untuk kembali pada *burner exit plane* yang mengakibatkan nyala api menjadi stabil.

T. A. Rohmat (1998) meneliti pengaruh suatu halangan pada struktur dan kestabilan api difusi laminar yang dilakukan pada sebuah plat berongga. Penelitian dilakukan dalam seksi uji yang dihubungkan dengan *wind tunnel* pada kecepatan rendah. Dengan menggunakan plat berongga dan metana sebagai bahan bakar, pada penelitian ini dihasilkan bentuk visual api difusi dan diagram kestabilan api. Dapat disimpulkan bahwa daerah kestabilan api dapat diperluas dengan menambahkan suatu halangan, meskipun fenomena apinya menjadi lebih kompleks. Hal tersebut terjadi karena aliran resirkulasi yang ditimbulkan di belakang halangan membuat pencampuran bahan bakar dengan udara menjadi lebih baik.

Berdasarkan penelitian tersebut, maka perlu dilakukan suatu pengembangan obyek penelitian yang lebih meluas, misalnya mengkombinasikan pemasangan *conical bluff body* dengan *tangential air jet inlets* pada api difusi *annulus jet*. Sebagai akibat timbulnya efek turbulensi setelah pemasangan *conical bluff body*, maka akan diketahui apakah pengaruh pemasangan *conical bluff body* dapat mengakibatkan proses pembakaran menjadi lebih sempurna, sehingga nantinya diharapkan terjadi peningkatan kestabilan dan distribusi temperatur. Oleh karena itu secara khusus dapat diteliti lebih lanjut pada efek pemasangan *conical bluff body* pada api difusi dengan cara memvariasikan diameter *conical bluff body* pada api difusi *annulus jet*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

Bagaimana pengaruh diameter *conical bluff body* terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tersebut lebih spesifik, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar *Liquified Petroleum Gas* (LPG) produksi Pertamina.

2. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan empat variasi yaitu pemasangan *conical bluff body* berdiameter 20, 30, 40 mm dan tanpa pemasangan *conical bluff body*.
3. Kerugian panas dan reaksi kimia yang terjadi selama proses pembakaran diabaikan.
4. Kondisi lingkungan dianggap memiliki kelembaban dan temperatur konstan.
5. Membahas kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh diameter *conical bluff body* yang paling optimal sebagai upaya peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari 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 mendekati sempurna.
4. Dapat meningkatkan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi terutama tentang teknologi pembakaran dengan pengaruh diameter *conical bluff body* pada api difusi *annulus jet*.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dengan udara (oksigen) dengan bantuan energi dari luar (energi aktivasi) disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor (Turns, 1996: 6).

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



Pembakaran terjadi melalui serangkaian reaksi yang cepat dan berkelanjutan yang dikenal sebagai reaksi rantai (*chain reaction*). Pada proses pembakaran hidrokarbon reaksi rantai meliputi:

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

Pada awal pembakaran, diperlukan nyala api atau loncatan api dari sumber lain, Sumber tersebut sering dikenal sebagai energi aktivasi yang berfungsi sebagai pemutus ikatan-ikatan bahan bakar menjadi radikal (ion) yang sangat reaktif. Ion-ion akan bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan-kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi. Sebagian temperatur pembakaran yang dihasilkan digunakan untuk menaikkan suhu bahan bakar hingga bahan bakar mampu terbakar dengan sendirinya sehingga bantuan nyala api sudah tidak diperlukan lagi hingga terjadi pembakaran mandiri.

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.

Kecepatan reaksi pembakaran merupakan faktor penting di dalam pembakaran karena dapat memperoleh energi yang cepat dengan adanya reaksi kimia pembakaran yang berlangsung sangat cepat.



Hal-hal yang dilakukan untuk meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran adalah:

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

Mengingat betapa pentingnya pembakaran dalam berbagai bidang, maka banyak dilakukan penelitian agar dihasilkan pembakaran yang sempurna atau ideal.

## 2.2 Pembakaran Sempurna

Pembakaran sempurna adalah pembakaran yang memenuhi kondisi stoikiometri, dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon ( $C_xH_y$ ) adalah  $CO_2$ ,  $H_2O$ , dan  $N_2$ .

Pada semua proses pembakaran, diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna.

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

- Bahan bakar dapat menguap secara cepat
- Digunakan cukup udara pembakaran
- Terjadi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara
- Suhu pembakaran cukup tinggi

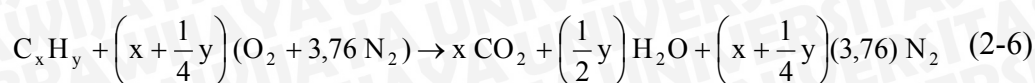
Apabila syarat-syarat diatas tidak terpenuhi, maka akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Reaksi pembakaran yang tidak sempurna misalnya seperti dibawah ini:



Pada proses pembakaran yang sempurna seluruh bahan bakar akan teroksidasi, seperti halnya reaksi pembakaran di bawah ini:



Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar ( $C_xH_y$ ) dengan udara secara matematis dituliskan sebagai berikut:



Untuk komposisi udara yang dipakai dalam reaksi pembakaran ditunjukkan pada tabel

## 2.1.

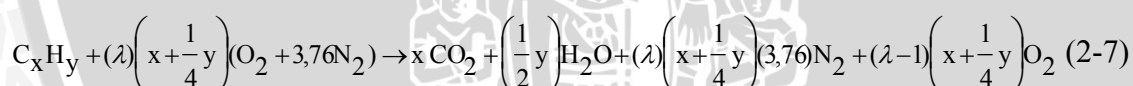
Tabel 2.1 Komposisi udara kering

Air	Proportion by volume (%)		Proportion by mass (%)	
	Actual	Use	Actual	Use
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oxigen	20,99	21	23,2	23,2
Argon	0,94	0	1,3	0
CO	0,03	0	0,05	0
Other	0,01	0	negligible	0

Sumber: Milton, 1993: 237

Supaya lebih mudah dalam perhitungan reaksi pembakaran, udara dianggap terdiri dari 21% volume O<sub>2</sub> dan 79% volume N<sub>2</sub>, sehingga untuk penggunaan 1 mol O<sub>2</sub> akan melibatkan penggunaan  $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$  mol N<sub>2</sub>.

Dalam kondisi aktual pembakaran sempurna hampir tidak pernah terjadi karena pembakaran berlangsung secara kompleks. Salah satu cara untuk memperbesar kemungkinan terjadinya pembakaran sempurna adalah dengan menggunakan jumlah udara berlebih (*excess air*) yang dapat menghindari terbentuknya gas CO. Udara berlebih biasanya disebut dengan udara sekunder, dalam penelitian ini udara sekunder disuplai melalui saluran udara tangensial. Apabila digunakan udara pembakaran sebanyak  $\lambda$  x jumlah udara teoritis, persamaan reaksinya akan menjadi:



dengan:  $\lambda$  = faktor kelebihan udara

$\lambda = 1$ , apabila dipergunakan udara teoritis

$\lambda > 1$ , apabila dipergunakan udara berlebih

$\lambda < 1$ , apabila kekurangan udara

Untuk menyatakan banyaknya udara pembakaran tiap satuan kuantitas bahan bakar digunakan parameter *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:

$$(AFR)_{\text{teoritis}} = \left( \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{teoritis}} = \left( \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right) \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-8)$$

Perbandingan antara  $(AFR)_{\text{teoritis}}$  dengan  $AFR_{\text{aktual}}$  dinyatakan dengan

*equivalence-ratio* ( $\Phi$ ), sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{(AFR)_{\text{teoritis}}}{(AFR)_{\text{aktual}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-9)$$

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

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

$\Phi = 1$ , apabila campuran stoikiometri

### 2.3 Penyalaan dan Batas Ketidakyalaan (*Limit of Inflammability*)

Penyalaan adalah suatu proses transisi dari keadaan tidak reaktif ke keadaan reaktif dan untuk menimbulkan transisi ini diperlukan rangsangan dari luar untuk menimbulkan proses termokimia yang berjalan dengan sendirinya, yang kemudian diikuti oleh transisi yang terjadi dengan sangat cepat untuk menghasilkan proses pembakaran yang mandiri (Kuo, 1986: 734). 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. Karena itu diperlukan tambahan energi dari luar, tambahan energi tersebut disebut energi aktivasi.

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

1. Suhu (*temperature*)

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

2. Waktu (*time*)

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

3. Turbulensi (*turbulence*)

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

Menurut teori, laju reaksi kimia tidak nol untuk suhu berapapun sesuai dengan persamaan Arrhenius berikut ini:

$$kf = A \exp \left[ -\frac{Ea}{Ru \cdot T} \right] \quad (\text{Kuo, 1986: 737}) \quad (2-10)$$

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

$Ea$  = energi aktivasi (J)

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

$T$  = suhu mutlak (K)

$A$  = konstanta

Pemakaian udara berlebih dalam proses pembakaran dalam jumlah banyak atau sedikit dari yang diperlukan akan menyebabkan kecepatan pembakaran berkurang. Dengan demikian ada dua batas suatu pembakaran akan berlangsung dengan kecepatan tinggi. Jika kedua batas ini ditarik menjauh, akan diperoleh dua batas terjadi tidaknya pembakaran (serta penyalaan) yang dikenal sebagai:

a. *Lower Inflammability Limit* (LIL)

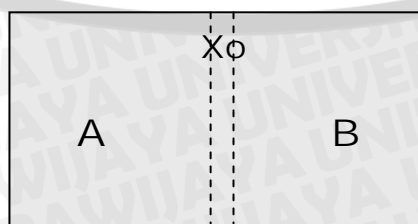
b. *Upper Inflammability Limit* (UIL)

LIL adalah suatu batas tidak lagi terjadi pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu banyak dibandingkan mol bahan bakar, sedangkan UIL adalah suatu batas tidak lagi terjadi pembakaran karena mol udara pembakaran terlalu sedikit dibandingkan dengan mol bahan bakar.

Pembakaran dibedakan menjadi dua, yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Namun dalam penelitian ini pembakaran yang akan dilakukan adalah jenis pembakaran difusi.

## 2.4 Pembakaran Difusi

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



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

Apabila terdapat ruangan tertutup yang disekat oleh bidang  $X_0$ . Bagian di sebelah kiri  $X_0$  berisi partikel gas A, sedangkan bagian di sebelah kanan  $X_0$  berisi partikel gas B pada tekanan yang sama sehingga tidak ada potensial aliran. Sesaat setelah bidang  $X_0$  dibuka, partikel gas A bergerak ke arah B dan partikel gas B akan bergerak ke arah A, sehingga dalam ruangan tercapai keseimbangan konsentrasi pada gas A dan gas B. Laju difusi diberikan oleh hukum *Fick*, yang menyatakan bahwa fluks difusi massa dari satu konstituen berbanding lurus dengan gradien fraksi massa. Hal tersebut dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$m_{A,diff}^{o,s} = \frac{\dot{m}_A^o}{A} = -\rho D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x} \quad (\text{Turn, 1996: 71}) \quad (2-11)$$

dengan :  $m_{A,diff}^{o,s}$  = flux difusi massa A ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

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

A = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

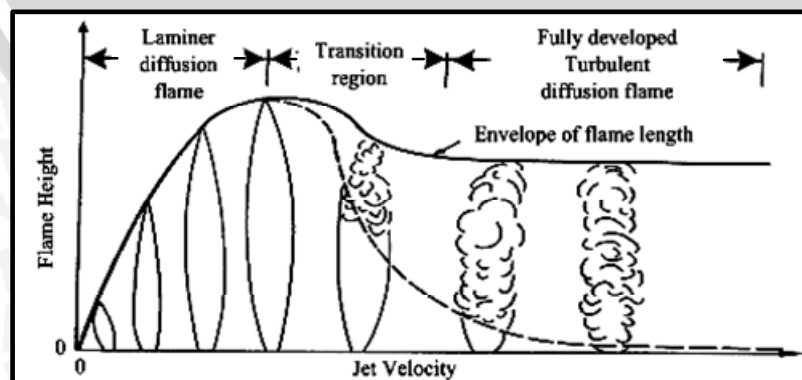
$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

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

$\frac{\partial Y_A}{\partial x}$  = gradien fraksi massa

Tanda minus menyatakan bahwa partikel mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.

Api difusi *jet* merupakan salah satu jenis pembakaran difusi. Api difusi *jet* adalah api difusi yang terjadi pada 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 2.2: Perubahan aliran dan struktur api  
Sumber: Kuo, 1986: 359

Gambar 2.2 menjelaskan tentang perubahan aliran api difusi *jet* laminer 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 laminer. Panjang api laminer tersebut akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakarnya sampai pada suatu batas aliran api menjadi turbulen. Pada kondisi transisi terjadi perubahan dari aliran laminer menjadi turbulen. Pada pembakaran tersebut, jika kecepatan aliran bertambah maka tingkat turbulensi akan semakin besar yang menyebabkan olakan pada api hingga menyebabkan panjang api semakin pendek

Turbulensi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran karena pada tingkat tertentu dapat membantu proses pengadukan bahan bakar dan udara sehingga campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen dan akhirnya akan diperoleh pembakaran yang sempurna.

## 2.5 Aliran Turbulen

Turbulensi adalah suatu keadaan dimana partikel-partikel (massa –massa molar yang kecil) fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang 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 analisis secara data eksperimen dapat digunakan sebagai acuan tentang turbulensi.

Aliran turbulen terjadi ketika ketidakstabilan pada aliran tidak cukup diredam oleh gaya viskos dan kecepatan aliran berfluktuasi secara acak (Turn, 1996: 358).

*Mean* (rata-rata) dan kuantitas fluktuasi digunakan untuk mengkarakterisasikan intensitas aliran turbulen. *Mean* (rata-rata) diambil dari waktu rata-rata properti aliran pada suatu rentang/interval waktu tertentu,

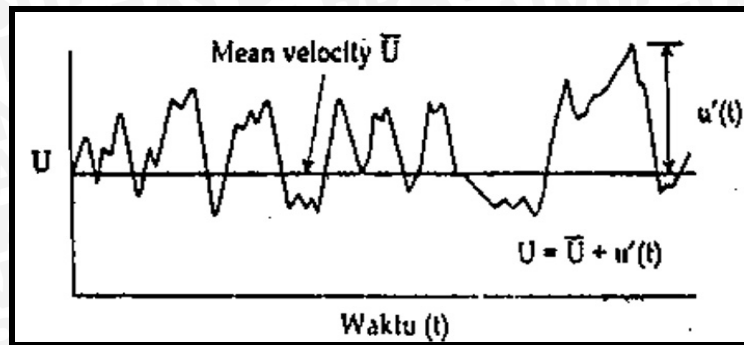
Persamaan kecepatan aliran turbulen adalah:

$$U = \bar{U} + u'(t) \quad (\text{Rathakrisnan, 1993: 56}) \quad (2-12)$$

Dengan :  $U$  = kecepatan sesaat

$u'(t)$  = fluktuasi kecepatan sekitar nilai rata-rata

$\bar{U}$  = kecepatan rata-rata



Gambar 2.3: Fluktuasi kecepatan rata-rata  
Sumber: Rathakrisnan, 1993: 56

Gambar 2.3 menunjukkan kecepatan makroskopik fluida pada sistem turbulen seperti yang diukur pada *anemometer* kawat panas. Pada aliran turbulen kecepatan partikel-partikel fluida sangat fluktuatif. Kecepatan yang fluktuatif tersebut disebabkan karena partikel-partikel fluida bergerak pada lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, akibatnya terjadi tumbukan dari masing-masing partikel fluida.

Dalam pembakaran difusi, laju pembakaran dibatasi oleh laju pencampuran bahan bakar dan udara, sehingga untuk mengetahui karakteristik laju pembakaran diperlukan sebuah parameter yang dinyatakan dengan *Damkohler number*, yaitu perbandingan antara *characteristic flow time* dan *characteristic chemical time*, seperti terlihat pada persamaan berikut:

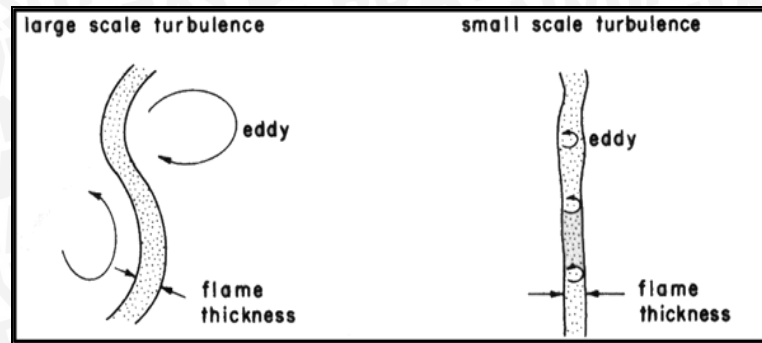
$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}} = \frac{l_o / v'_{rms}}{\delta_L / S_L} \quad (\text{Turn, 1996: 389}) \quad (2-13)$$

dengan :

- $Da$  = *damkohler number*
- $\tau_{flow}$  = *characteristic flow time*
- $\tau_{chem}$  = *characteristic chemical time*
- $l_o$  = *largest eddy size (integral scale) (m)*
- $v'_{rms}$  = *root-mean-square velocity (m.s<sup>-1</sup>)*
- $\delta_L$  = *laminar flame thickness (m)*
- $S_L$  = *laminar flame speed (m.s<sup>-1</sup>)*

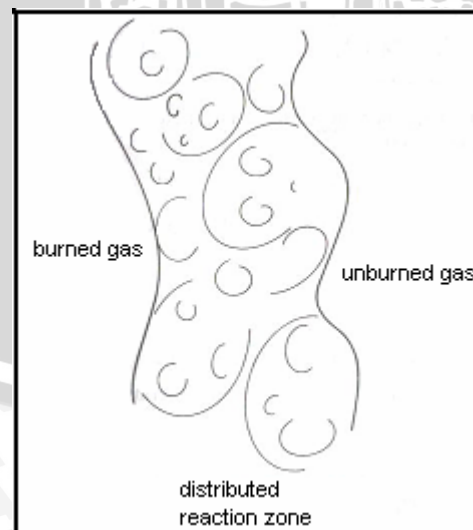
Jika laju reaksi kimia reaktan lebih cepat dari pada laju pencampuran reaktan, maka  $Da \gg 1$ , sebaliknya jika laju pencampuran reaktan lebih cepat daripada laju reaksi kimia reaktan, maka  $Da \ll 1$ , karena laju berbanding terbalik dengan waktu.

Baik pengaruh *conical bluff body* maupun kecepatan tangensial akan membagi aliran fluida menjadi skala (*scale*) yang lebih kecil, sehingga akan berpengaruh terhadap struktur permukaan nyala seperti ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4: Efek *scale of turbulence* pada permukaan nyala  
Sumber: Kuo, 1986: 418

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 awal pembakaran (efek pemanasan awal). Efek yang ditimbulkan adalah meningkatkan proses *transport* (distribusi) dalam gelombang pembakaran. *Large Eddies* yang menyebabkan ketebalan permukaan nyala lebih besar dari pada saat kondisi laminar. *Large Eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small Eddies*, tetapi sebaliknya akan merubah permukaan nyala laminar yang *smooth* menjadi bentuk lipatan-lipatan pada permukaan nyala. Hal ini akan meningkatkan daerah permukaan nyala, akibatnya terjadi peningkatan kecepatan pembakaran tanpa terjadi perubahan pada struktur api lokal.



Gambar 2.5: Gambar *Distributed Reaction Zone*  
Sumber: Turn, 1996: 397

Gambar 2.5 menunjukkan berbagai skala panjang turbulensi (*small Eddies* dan *large Eddies*) di dalam zona *distributed-reaction*. Zona *distributed-reaction* merupakan



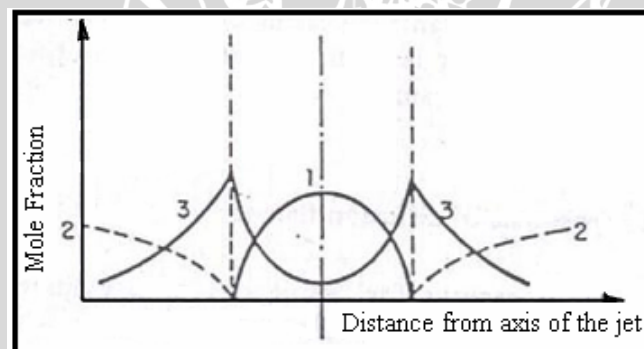
tempat terbentuknya radikal bebas yang terjadi akibat adanya distribusi energi ke reaktan yang belum terbakar, yang nantinya dapat berfungsi sebagai pemanas awal sehingga dapat meningkatkan kecepatan pembakaran.

Kuo (1986) dalam *Principles of Combustion* menyatakan 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, dengan semakin tinggi temperatur awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

## 2.6 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 gambar 2.6 menunjukkan bahwa bahan bakar dan oksigen yang mampu menembus batas nyala api sangat kecil dan menunjukkan reaksi kimia mampu diselesaikan pada daerah batas dan daerah permukaan api. Dimana diperkirakan sebagai permukaan adalah bahan bakar dan oksigen yang masuk dalam proporsi stoikiometri.



Gambar 2.6: Konsentrasi Api Laminer

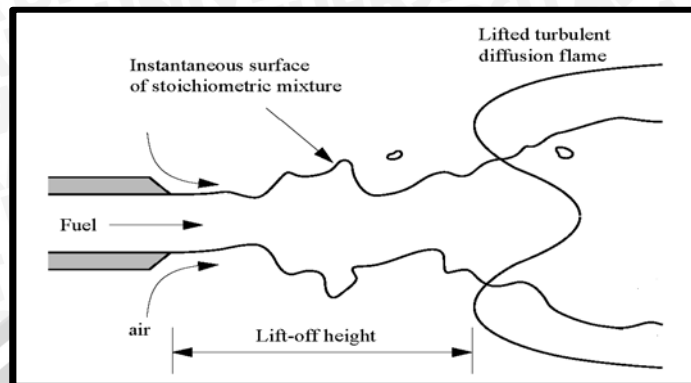
Sumber: Monnot, 1985: 87

- Dimana:
1. Konsentrasi bahan bakar
  2. Konsentrasi oksigen
  3. Konsentrasi produk pembakaran

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 nyala.

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

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



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

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.

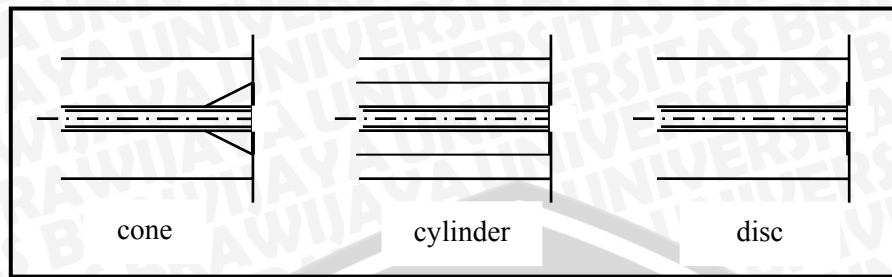
Panjang *lift off* adalah jarak antara mulut nosel dan pangkal api. Panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan *jet* bahan bakar sampai api mengalami *blow off* (kondisi api menjadi padam setelah mengalami *lift off*). *Blow off* terjadi bila api difusi telah melewati batas kritis *lift off*. *Flame stretch* atau pemanjangan api akibat efek *blow off* terjadi jika kecepatan reaktan yang lebih cepat dari kecepatan pembakaran dan juga akibat 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.

*Lift off* maupun *blow off* sangat tidak diharapkan dalam dunia pembakaran, maka banyak peneliti yang melakukan berbagai uji coba untuk mengurangi terjadinya *lift off* maupun *blow off*, salah satunya dengan pemasangan bluff body baik pada aliran udara maupun bahan bakar.

## 2.7 Bluff Body Recirculation

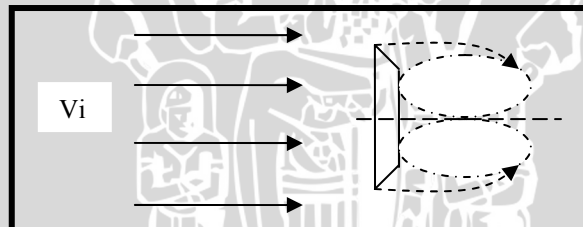
Salah satu cara untuk menimbulkan turbulensi adalah dengan memasang benda penghalang, di dalam dunia pembakaran disebut sebagai *bluff body*. Beberapa bentuk geometris yang dapat dipakai sebagai *bluff body* misalnya *cone*, *cylinder* dan *disc* (cakram) seperti pada gambar 2.8. *Bluff body* merupakan suatu obyek penghalang yang

diletakkan pada ujung aliran sehingga mampu membuat suatu olakan dalam aliran di belakang benda.



Gambar 2.8 Bentuk *bluff body*  
Sumber: Monnot, 1985: 87

*Bluff body* akan mengakibatkan terjadinya perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang melewatinya. Perbedaan tersebut mengakibatkan terjadinya batas gesekan (*shear layer*) antara aliran resirkulasi dan daerah utama. Pada permukaan gesekan tersebut terjadi perpindahan panas dari produk pembakaran ke bahan bakar, sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal. Adanya pemanasan awal mengakibatkan terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Hal ini mengakibatkan molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin sempurna. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.9.



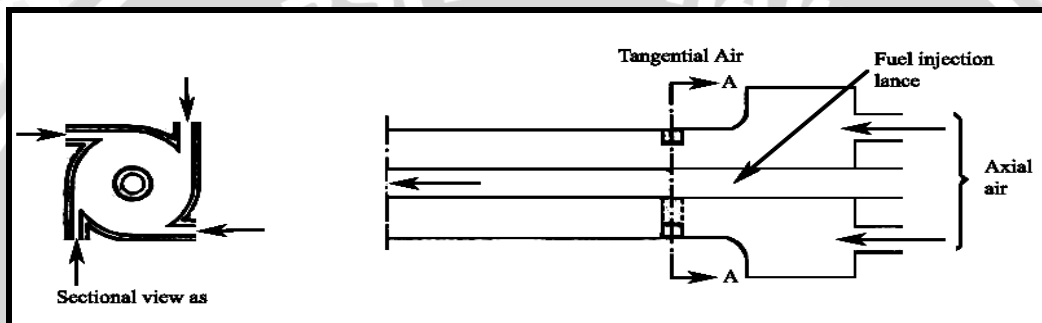
Gambar 2.9 *Downstream of obstruction*  
Sumber: Monnot, 1985: 81

Ada beberapa cara yang sering dipergunakan dalam menghasilkan pembakaran yang stabil, antara lain dengan:

1. Memasukan bahan bakar secara tangensial ke ruang bakar sehingga terjadi aliran siklon dalam ruang bakar.
2. Menggunakan *swirl nozzle* untuk menyemburkan bahan bakar agar bahan bakar keluar nosel berbentuk pusaran.
3. Menggunakan *bluff body* sebagai hambatan pada aliran udara sehingga didapat efek turbulensi pada aliran di belakangnya.
4. Menggunakan *swirling vanes* sehingga aliran udara dari *blower* membentuk pusaran.

## 2.8 Aliran Udara Tangensial

Selain berfungsi sebagai penyuplai udara skunder penambahan aliran udara tangensial (pada gambar 2.9) juga bertujuan untuk menciptakan daerah *downstream* bertekanan rendah pada burner sepanjang sumbunya. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan udara pembakaran dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar sekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran aksial daripada gaya udara sekitar penghalang. Perputaran ini menimbulkan gaya sentrifugal sehingga mengakibatkan fluida terkumpul di batas lingkaran silinder (keliling) sebagai tekanan rendah statik yang berada sepanjang sumbu. Fluida mulai berputar biasanya melibatkan pembakaran udara baik seluruhnya maupun sebagian.



Gambar 2.10: Diagram burner dengan udara berputar menggunakan *tangential air*  
Sumber: Monnot, 1985: 92

Pemasangan *tangential air jet inlets* akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl* yang menimbulkan terjadinya zona resirkulasi. Hal tersebut terjadi karena adanya perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang menyebabkan adanya batas gesekan (*shear layer*) antara aliran resirkulasi dengan daerah utama, dimana pada permukaan gesekan tersebut terjadi perpindahan panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar), sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal.

## 2.9 Distribusi Kecepatan Dalam Aliran Berputar

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

$$G_\phi = \int_0^{r_0} 2\pi\rho U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-14)$$

dengan:

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

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

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

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

$U$  = kecepatan aksial di titik  $r$  (m/s)

$W$  = kecepatan tangensial di titik  $r$  (m/s)

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

$$G_{\phi} = 2\pi\rho \int_0^{r_0} U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-15)$$

Penjelasan untuk aliran aksial ditulis:

$$G_x = \int_0^{r_0} 2\pi \rho U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-16)$$

sehingga:

$$G_x = 2\pi \rho \int_0^{r_0} U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-17)$$

Bentuk kedua dalam penjelasan di atas untuk  $G_x$  adalah tekanan, dan tidak begitu berpengaruh jika penurunan tekanan statik sepanjang sumbu burner kecil.

Percobaan menunjukkan bahwa  $\frac{\partial p}{\partial x}$  tidak hanya kecil tetapi kenyataannya *uniform* pada bidang yang tegak lurus pada sumbu burner.

Untuk merubah perbandingan  $\frac{G_{\phi}}{G_x}$  menjadi suatu nilai tidak berdimensi,  $G_x$  dikalikan dengan panjangnya, sebagai contoh  $r_0$ ,  $G_x$  dan nilai yang tidak berdimensi ini disebut sebagai angka *swirl* yang seringkali digunakan untuk menentukan intensitas gerakan rotasi. Angka *swirl* dirumuskan:

$$S = \frac{G_{\phi}}{r G_x} \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-18)$$

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

## 2.10 LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

LPG merupakan campuran dari berbagai *hydrocarbon* yang dikenal dengan bahan bakar gas cair karena dengan menambah tekanan atau menurunkan temperatur akan membuatnya menjadi cair. LPG dihasilkan melalui proses pengolahan gas alam dan gas minyak bumi di instalasi pencairan dan pemisahan (*Gas Liquid Extraction Plant*). Proses produksi LPG diawali oleh pembersihan gas alam dari berbagai kotoran. Selanjutnya gas yang sudah bersih dikeringkan, lalu didinginkan sehingga menjadi cair. Gas yang sudah cair ini dipisahkan dengan proses *physico-chemical* di instalasi pemisahan berturut-turut mengeluarkan senyawa metana ( $\text{CH}_4$ ), ethana ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propana ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butana ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) dan seterusnya. LPG merupakan suatu senyawa hidrokarbon dengan karbon yang rendah dan termasuk senyawa hidrokarbon jenuh (*alkane*). LPG bisa dibuat dari senyawa propana (*propane*), butana (*butane*) atau campuran keduanya dengan perbandingan tertentu. Berdasarkan penggunaannya, LPG dibedakan menjadi:

### 1. LPG *Mix*

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

### 2. LPG *Propane*

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

### 3. LPG *Butane*

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

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah LPG (*Liquified Petroleum Gas*) *Mix* produksi Pertamina dengan komposisi 70 % volume propana dan 30% volume butana. Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane*.

Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang

dikandungnya, tabung LPG tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya.

Sifat dari LPG terutama adalah sebagai berikut:

- Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar
- Gas tidak beracun, tidak berwarna dan biasanya berbau menyengat
- Gas dikirirkan sebagai cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
- Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
- Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

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

<i>Properties</i>	<i>Hydrocarbon</i>	<i>propane</i>	<i>n - butane</i>
	<i>High heating value</i>	(kcal.kg <sup>-1</sup> )	12.034
	(kcal.m <sup>-3</sup> )	24.290	31.990
<i>Low heating value</i>	(kcal.kg <sup>-1</sup> )	11.079	10.926
	(kcal.m <sup>-3</sup> )	22.370	29.540
kg air /kg fuel		15,63	15,42
(NTP) m <sup>3</sup> air /kg fuel		12,09	11,93
(NTP) m <sup>3</sup> air / m <sup>3</sup> fuel		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

## 2.11 HIPOTESIS

Berdasarkan teori yang telah dikemukakan di atas, penambahan diameter *conical bluff body* pada aliran udara pembakaran akan menyebabkan timbulnya pusaran yang semakin kuat, akibatnya campuran bahan bakar dan udara semakin homogen, sehingga kestabilan nyala akan meningkat dan distribusi temperatur pada api difusi *annulus jet* akan menjadi lebih merata.

## 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:

- Diameter *conical bluff body* (D) : tanpa *conical*, 20, 30 dan 40 mm
- Kecepatan aliran bahan bakar (V) :  $1 \text{ m.s}^{-1}$  -  $20 \text{ m.s}^{-1}$
- Kecepatan aliran udara tangensial (W) :  $1 \text{ m.s}^{-1}$  -  $20 \text{ m.s}^{-1}$

##### 2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada 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 :

- Tinggi *conical bluff body* (h) : 50 mm
- Jumlah *tangential air jet inlets* : 4
- Kecepatan aliran udara aksial (U) :  $1.023 \text{ m.s}^{-1}$
- Diameter saluran bahan bakar : 2 mm
- Diameter *tangential air jet inlets* : 3 mm
- Sudut inklinasi *tangential air jet inlets* ( $\theta$ ) :  $60^\circ$



### 3.3. Alat-alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Blower*

*Blower* digunakan untuk mensuplai udara pembakaran. *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
- f. Frekuensi : 50 Hz

2. *Stop valve*

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

3. Orifis

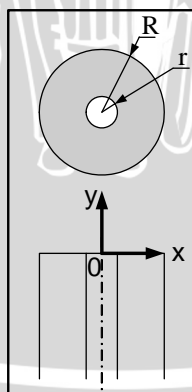
Digunakan untuk mengetahui beda tekanan gas LPG dan beda tekanan udara yang mengalir melalui saluran.

4. Nosel

Berfungsi untuk menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar. Nosel yang digunakan berdiameter 2 mm.

5. *Annulus*

*Annulus* adalah suatu ruang bebas yang terletak antara dua lingkaran yang mempunyai titik pusat yang sama. Gambar 3.1 menjelaskan tentang skema *annulus*, luasan yang diarsir adalah luasan *annulus*.



Gambar 3.1 : Skema annulus

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

Luas penampang melintang *annulus* dituliskan seperti berikut:

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

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

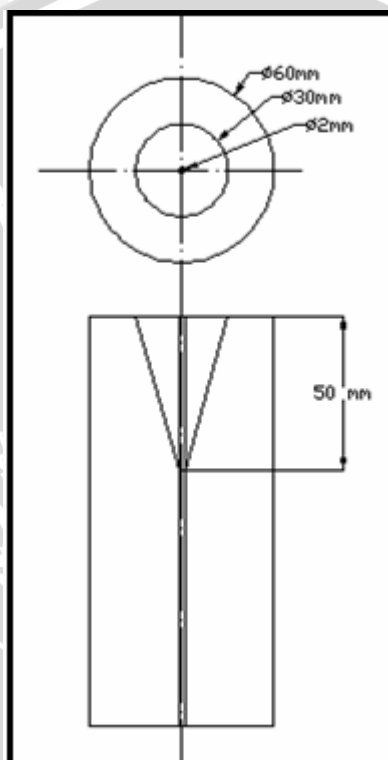
r = jari-jari lingkaran dalam (m)

## 6. 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 saluran bahan bakar berdiameter 2 mm terletak pada pusat *annulus*.

7. *Conical Bluff Body*

*Conical Bluff Body* adalah suatu penghalang berbentuk kerucut, berfungsi agar aliran fluida yang mengalir melalui *annulus* dapat membentuk aliran turbulen.



Gambar 3.2 : Skema *Conical Bluff Body*

8. *Tangential air jet inlets*

*Tangential air jet inlets* adalah suatu alat yang dipergunakan untuk memasukkan aliran udara secara tangensial dengan sudut tertentu dan diharapkan menghasilkan aliran berputar yang dihasilkan oleh kompresor. *Tangential air jet inlets* diletakkan pada *annulus* udara pada posisi 150 mm pada sumbu *y burner exit plane*.

## 9. Tabung gas

Tabung Gas digunakan untuk menampung bahan bakar gas LPG

10. *Manometer*

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

## 11. Kamera digital

Digunakan untuk mengambil gambar nyala api, baik gambar nyala api yang tanpa

*conical bluff body* maupun dengan *conical bluff body*. Kamera digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. *Merk* : Fuji
- b. *Model* : FinePix S3000
- c. *Resolution* : 3,2 Mega pixels
- d. *Optical zoom* : 6 x
- e. *File formats* : JPEG

## 12. 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.

## 13. Cerobong

Cerobong merupakan tempat keluarnya asap dari hasil proses pembakaran.

## 14. *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.

## 15. Perangkat Sensor

Perangkat sensor terdiri dari:

### a. *Operational Amplifier*

Digunakan untuk menguatkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor.

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

ADC berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan dari sensor menjadi sinyal digital agar dapat di baca oleh komputer.

## 16. Kaca pengamatan

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

## 17. Komputer

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

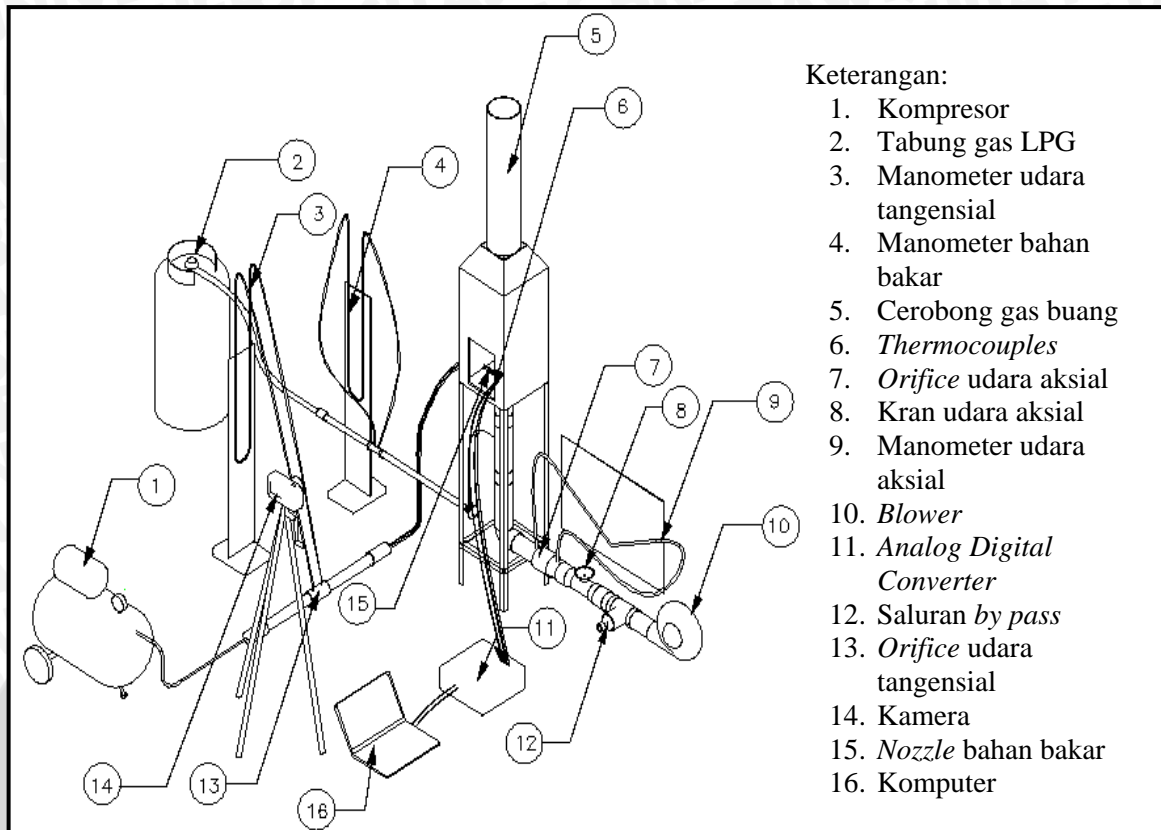
## 18. Kompresor

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

### 3.4. Instalasi Penelitian



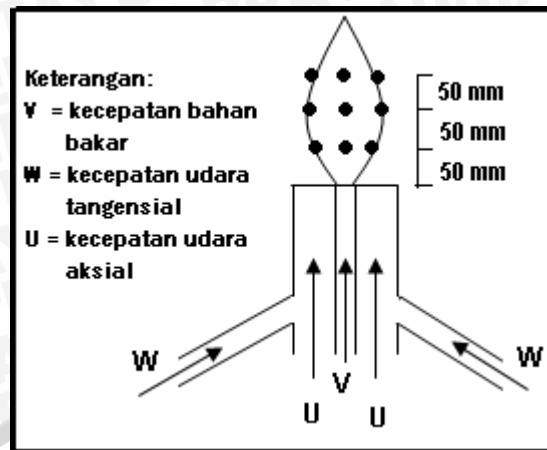
Gambar 3.3 Skema instalasi penelitian

### 3.6. 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  $1,0581 \text{ m.s}^{-1}$
3. Menentukan kecepatan *jet* aliran udara tangensial 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*.
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 4 sampai 6.
9. Melakukan langkah 2 sampai 7 dengan diameter *conical bluff body* yang berbeda.



Gambar 3.4 Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

b) Untuk mengetahui fluktuasi temperatur:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengatur *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan aliran  $1,0581 \text{ m.s}^{-1}$
3. Membuka *stop valve* bahan bakar pada kecepatan aliran tertentu.
4. Menentukan kecepatan aliran udara *tangential air jet inlets* pada *annulus* udara.
5. Menyalakan api pada saat kondisi tersebut.
6. Mengambil data temperatur api difusi *annulus jet* dengan menggunakan *thermocouples* yang diletakkan pada api dengan jarak seperti pada gambar 3.4 dan perangkat komputer. Data yang diambil sebanyak 300 data.
7. Mematikan api dan melakukan langkah 2 sampai 6 dengan diameter *conical bluff body* yang berbeda.

### 3.7. Rancangan Pengolahan Data

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

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (\text{Hifni, 1993: 42}) \quad (3-1)$$

dengan:  $\bar{X}$  = nilai rata-rata keseluruhan data

$n$  = jumlah data

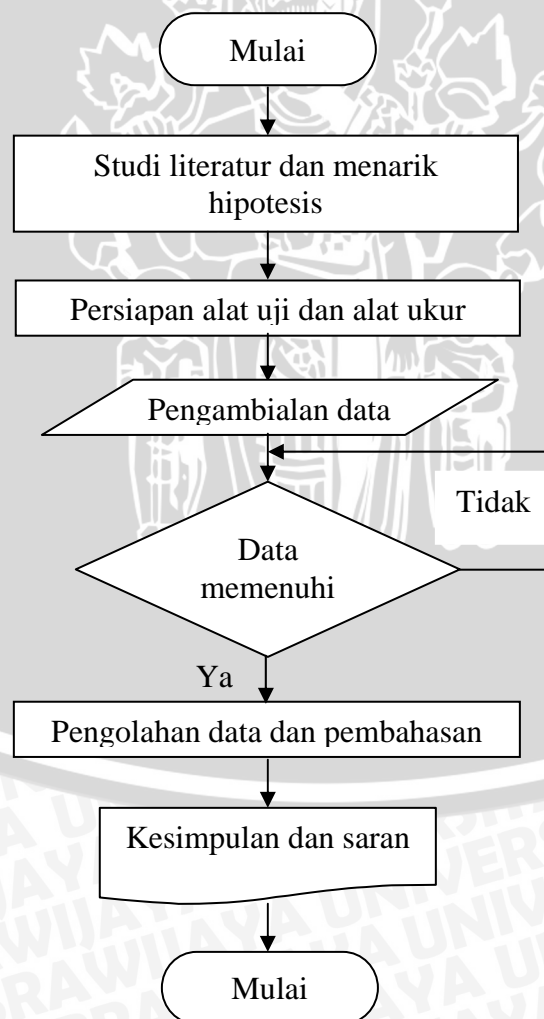
$X_i$  = data ke  $i$

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

### 3.8. Diagram Alir Penulisan

Alur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada flow chart di bawah (gambar 3.5). Studi literatur dilakukan dengan mengambil teori-teori yang mendukung penelitian dari referensi, baik itu dari buku, penelitian sebelumnya, maupun jurnal-jurnal. Dari teori-teori tersebut dapat diambil suatu hipotesis awal tentang permasalahan yang diamati. Setelah mempersiapkan alat uji dan alat ukur, pengambilan data dapat dilakukan dengan menentukan variasi data yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam penelitian ini variasi alat uji yang digunakan adalah diameter *conical bluff body* dengan variasi 20, 30, 40 mm dan tanpa menggunakan *conical bluff body*.

Data yang diperoleh kemudian diolah hasilnya diplot dalam bentuk grafik untuk mempermudah proses analisa dan pembahasan. Dari hasil pembahasan diperoleh beberapa kesimpulan terkait dengan penelitian yang telah dilakukan. Kemudian beberapa saran yang bertujuan untuk memperbaiki penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 3.5 Diagram alir penulisan

## BAB IV

### DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Hasil Penelitian

Data yang telah diperoleh dari masing-masing variasi penelitian, yaitu kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer baik itu udara aksial maupun tangensial, serta kecepatan aliran bahan bakar. Dengan beda tekanan pada penampang saluran, 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 diagram kestabilan api (pada sumbu X – Y), sedangkan dari data temperatur akan diperoleh nilai temperatur rata-rata sehingga diketahui distribusi temperatur ke arah horisontal dan arah vertikal dan pada tiap titik pengamatan diperoleh data fluktuasi temperatur.

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

##### 4.2.1. Data penelitian

Data didapat dari nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 5 kali, sehingga bisa mewakili keragaman dari data yang diperoleh. Data kestabilan nyala api difusi *annulus jet* dengan berbagai variasi diameter *conical bluff body* terdapat pada lampiran 2 sampai dengan lampiran 5.

##### 4.2.2. 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
  - $C$  = konstanta pengukuran manometer
  - $D_{\text{bb}}$  = diameter pipa bahan bakar (0,01 m)

- $D_{ud}$  = diameter pipa udara (0,06 m)  
 $D_{jet}$  = diameter orifis saluran udara tangensial (0,0272 m)  
 $d_{bb}$  = diameter dalam orifis bahan bakar (0,004 m)  
 $d_{ud}$  = diameter dalam orifis udara (0,02 m)  
 $d_{jet}$  = diameter dalam orifis saluran jet tangensial (0,007 m)  
 $A_{udara\ jet}$  = luas orifis saluran jet tangensial ( $5,808 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ )  
 $A_{jet}$  = luas saluran jet tangensial ( $7,065 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ )

Contoh perhitungan data untuk tanpa pemasangan *conical bluff body*

A. Kecepatan udara aksial pada ketinggian ( $\Delta h$  minyak) = 25 mm Minyak

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

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

$$v_{aksial} = (0,514) \frac{(0,02)^2}{(0,06)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 25) / 1000}{(1,208 \cdot (1 - (0,333)^4))}} = 1,0581 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

B. Kecepatan bahan bakar pada ketinggian  $\Delta h = 30 \text{ mm Hg}$

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

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

$$v_b = (0,484) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13.600 \cdot 9,81 \cdot 30) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 4,952 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

C. Kecepatan udara tangensial pada ketinggian ( $\Delta h \text{ Hg}$ ) = 2 mm Hg

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

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

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

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



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

Jadi untuk kecepatan total saluran udara tangensial adalah:

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

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

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

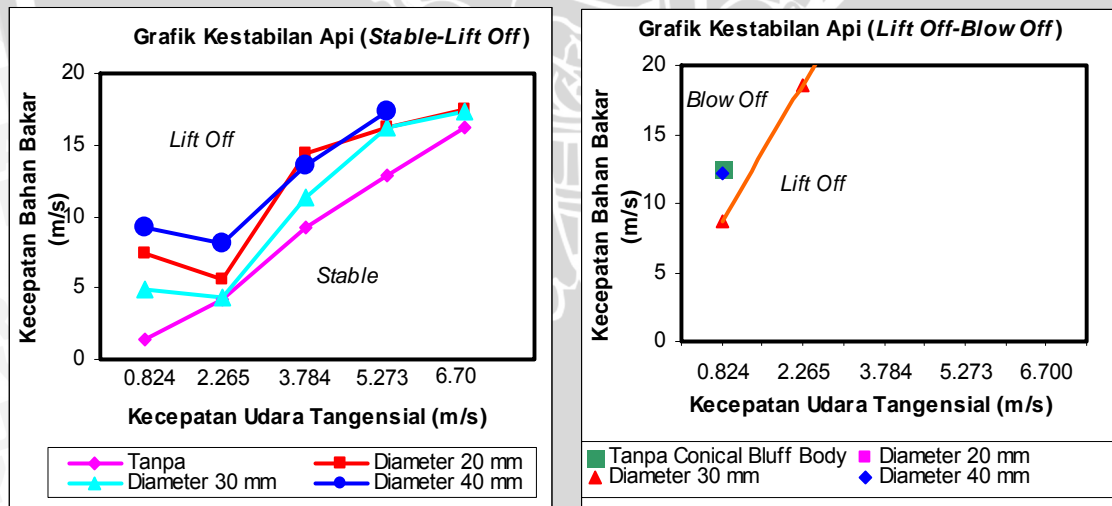
$$1,226 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1} = 3,414 \cdot 10^{-5} \text{ [kg.m}^{-1}\text{]}$$

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

Jadi untuk empat buah saluran udara tangensial, kecepatan masing – masing jet adalah  $0,824 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ .

#### 4.2.3. Grafik Kestabilan Api

Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* dibuat dengan menerangkan hubungan antara kecepatan aliran udara tangensial dengan kecepatan aliran bahan bakar. Pada masing-masing variasi penelitian, diagram 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 4.1 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai kondisi

Gambar 4.1 menunjukkan grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi penelitian, yaitu tanpa pemasangan *conical bluff body* dan dengan *conical bluff body* berdiameter 20, 30 dan 40 mm. Secara umum pada pemasangan *conical bluff body* dengan berbagai variasi diameter memiliki daerah kestabilan yang lebih luas bila

dibandingkan dengan tanpa pemasangan *conical bluff body*. Terlihat bahwa pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 40 mm memiliki luasan daerah kestabilan api yang paling luas (gambar a). Hal tersebut disebabkan pengaruh pemasangan *conical bluff body* dapat meningkatkan kecepatan aliran udara pembakaran sehingga mampu menciptakan aliran resirkulasi, yang berarti juga akan dapat meningkatkan proses difusi. Hal ini terjadi karena semakin cepat aliran udara, 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*) dibanding dengan waktu untuk mengalir (*characteristic flow time*) telah mencukupi untuk dapat menghasilkan campuran yang baik. Hal ini mengakibatkan api mempunyai batas kecepatan tertentu untuk mengalami perubahan menjadi kondisi *lift off* sehingga dapat diperoleh luasan daerah kestabilan yang lebih besar.

Dari gambar tersebut menunjukkan daerah api stabil, daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*, dimana semakin besar aliran udara tangensial (dari 0.824 m/s hingga 6.70 m/s) maka *lift off* memiliki kecenderungan semakin lambat terjadi dan bahkan sedikit terjadi *blow off*. Hal tersebut dikarenakan semakin besar diameter *conical bluff body* akan menyebabkan pusaran yang semakin besar pula. Pusaran tersebut akan membuat api lebih lambat mengalami *lift off*. Pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 40 mm kecepatan aliran udara lebih dari  $12,217 \text{ m.s}^{-1}$  sudah tidak terlihat adanya *blow off*, sehingga api tetap menyala pada kondisi *lift off* meskipun bahan bakar mengalir pada kondisi maksimum. Untuk tanpa pemasangan *conical bluff body* pada kecepatan  $12,401 \text{ m.s}^{-1}$ . Sedangkan pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 30 mm *blow off* sudah tidak terjadi lagi pada kecepatan  $16,577 \text{ m.s}^{-1}$ . *Blow off* tidak terjadi pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 20 mm. Hal ini terjadi karena pada kondisi tersebut resirkulasi yang terjadi pada kondisi maksimum, sehingga proses pencampuran 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.

Pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 30 mm luas daerah stabil cenderung semakin menyempit bila dibandingkan dengan pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 20 mm, karena pada diameter 20 mm udara dapat mengalir dengan lebih lambat disebabkan luasan tempat keluarnya udara pembakaran lebih luas dibandingkan dengan diameter 30 mm, sehingga udara pembakaran mempunyai waktu

yang cukup untuk bercampur dengan bahan bakar sehingga campuran antara keduanya menjadi lebih baik. Sedangkan pada setiap pemasangan *conical bluff body* cenderung turun pada  $W = 2,265$  m/s, hal ini diakibatkan adanya pemasangan *conical bluff body* sehingga mempengaruhi kecepatan udara pembakaran. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Raman V. (2005) bahwa kecepatan aliran udara sangat berpengaruh terhadap luasan zona resirkulasi, di mana semakin cepat aliran udara menyebabkan zona resirkulasi mengalami penurunan luasan. Hal itu disebabkan karena kecepatan aliran udara yang besar menyebabkan timbulnya suatu kondisi *chaos* yang menyebabkan terjadinya fenomena pusaran. Dengan adanya fenomena tersebut, api cenderung lebih cepat *lift off*.

### 4.3. Distribusi Temperatur Api Difusi *Annulus Jet*

#### 4.3.1 Data penelitian

Data diambil dari 9 titik pengukuran, tiap titik pengukuran diperoleh 300 data temperatur yang ditampilkan dalam grafik fluktuasi temperatur (lampiran 6 s/d 13). Dari data temperatur diambil nilai rata-ratanya, kemudian diplot dalam grafik, sehingga dapat diketahui distribusi temperatur ke arah horizontal dan arah vertical (aksial).

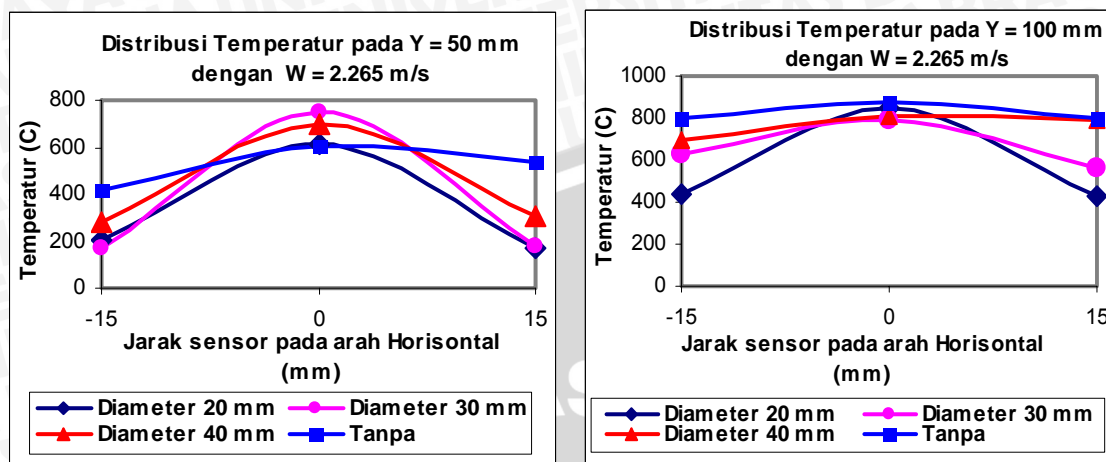
#### 4.3.2 Pengukuran temperatur

Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouples* tipe K. Pada prinsipnya *thermocouples* merupakan korelasi antara tegangan dengan temperatur yang dihasilkan *thermocouples*. Pengukuran temperatur tersebut didapat dengan mengukur tegangan yang dihasilkan *thermocouples* menggunakan AVO meter dan pada saat yang sama temperatur pada api diukur menggunakan *thermo controller*.

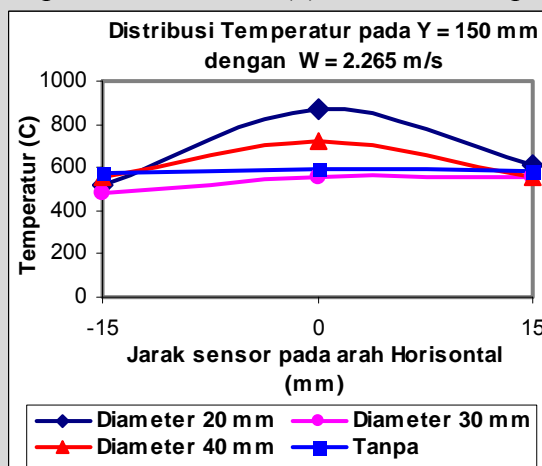
Data yang diperoleh tersebut kemudian dimasukkan ke bahasa program dalam database *Analog to Digital Converter* (ADC), dimana ADC ini berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan dari sensor analog menjadi sinyal digital agar dapat dibaca oleh komputer, sehingga untuk setiap pembacaan perubahan tegangan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

### 4.3.3 Grafik distribusi temperatur dengan berbagai variasi diameter *conical bluff body* pada arah aksial

1. Grafik distribusi temperatur pada  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



(a) Distribusi temperatur pada Y = 50 mm (b) Distribusi temperatur pada Y = 100 mm



(c) Distribusi temperatur pada Y = 150 mm

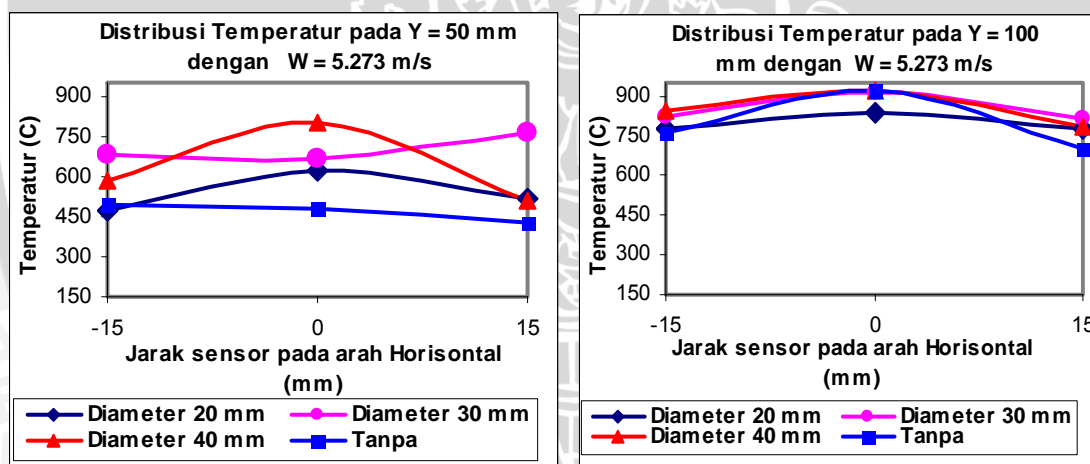
Gambar 4.2 Grafik distribusi temperatur dengan variasi diameter *conical bluff body*  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

Gambar 4.2 (a), (b), dan (c) menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi sensor temperatur pada berbagai variasi penelitian yaitu tanpa pemasangan *conical bluff body*, *conical bluff body* dengan diameter 20 mm, 30 mm dan 40 mm dengan posisi peletakan sensor temperatur pada sumbu Y = 50 mm, Y = 100 mm, dan Y = 150 mm. Kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , kecepatan aliran bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$  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.

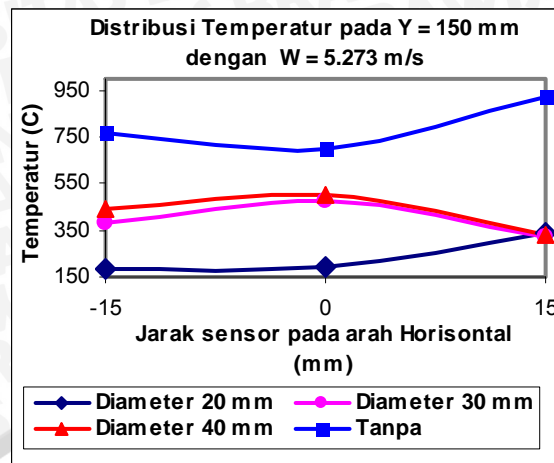
Dari seluruh grafik memiliki kecenderungan yang sama yaitu memiliki temperatur tertinggi pada  $X = 0 \text{ mm}$ , karena pada jarak tersebut bahan bakar memiliki

kecepatan tinggi yang terpusat di sumbu, ditambah juga dengan suplai udara dari aliran sirkulasi yang dihasilkan akibat adanya pemasangan *conical bluff body*, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara dapat berlangsung secara maksimal. Temperatur tinggi tersebut mengindikasikan bahwa pada kondisi tersebut proses pembakaran berlangsung dengan baik. Pada dasarnya temperatur merupakan fungsi dari *equivalence-ratio* ( $T = f(\Phi)$ ), sehingga temperatur tertinggi akan didapatkan pada saat kondisi mendekati stoikiometri ( $\Phi \approx 1$ ). Oleh karena itu pada bagian tengah api temperaturnya cenderung paling tinggi, sedangkan temperatur yang paling rendah terjadi pada bagian tepi api. Pada tepi api ( $X = -15$  mm dan  $X = 15$  mm) 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.

## 2. Grafik distribusi temperatur pada $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



(a) Distribusi temperatur pada Y = 50 mm (b) Distribusi temperatur pada Y = 100 mm



(c) Distribusi temperatur pada  $Y = 150$  mm

Gambar 4.3 Grafik distribusi temperatur dengan variasi diameter *conical bluff body*  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

Pada kecepatan aliran udara tangensial  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  (gambar 4.3) efek pemasangan *conical bluff body* terlihat lebih jelas. Pada posisi sensor  $Y = 50$  mm dan  $Y = 150$  mm terlihat bahwa yang terjadi adalah sebaliknya, dimana temperatur pada sumbu  $X = 0$  mm lebih rendah dari temperatur tepi api. Hal ini disebabkan karena adanya resirkulasi produk panas pembakaran pada daerah tersebut sebagai akibat dari ketidakseimbangan antara kecepatan gas bahan bakar pada sumbu  $X = 0$  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  $X = -15$  mm dan  $X = 15$  mm.

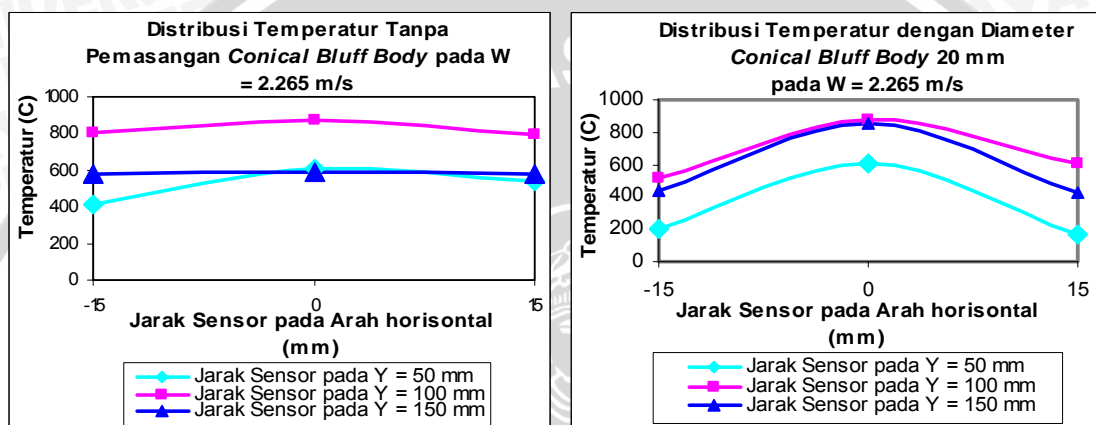
Pada Gambar 4.3 (b) terlihat bahwa pada pemasangan tanpa *conical bluff body*, temperatur terdistribusi secara merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang rendah bila dibandingkan dengan distribusi temperatur pada  $Y = 50$  mm dan  $Y = 150$  mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi tersebut terjadi proses pencampuran bahan bakar dan udara yang paling baik, sehingga terjadi pembakaran yang merata pada hampir seluruh daerah pencampuran.

Pada Gambar 4.3 (c) terlihat bahwa pemasangan *conical bluff body* memiliki cukup pengaruh, dimana temperatur pembakaran terdistribusi tidak merata dalam arah aksial dengan tingkat perubahan temperatur yang cukup besar. Hal ini terlihat dari tingkat temperatur yang tidak sama pada berbagai variasi pemasangan *conical bluff body*. Hal tersebut dikarenakan perbedaan bentuk api, dimana bentuk api tersebut dipengaruhi oleh adanya beda kecepatan udara pembakaran akibat adanya pemasangan

*conical bluff body*. Dengan adanya pemasangan *conical bluff body* kecepatan udara akan semakin meningkat sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* akan meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi, sehingga api mengalami pemendekan. Pemendekan pada dimensi api inilah yang mengakibatkan temperatur berkurang pada jarak peletakan sensor yang paling jauh dari nosel.

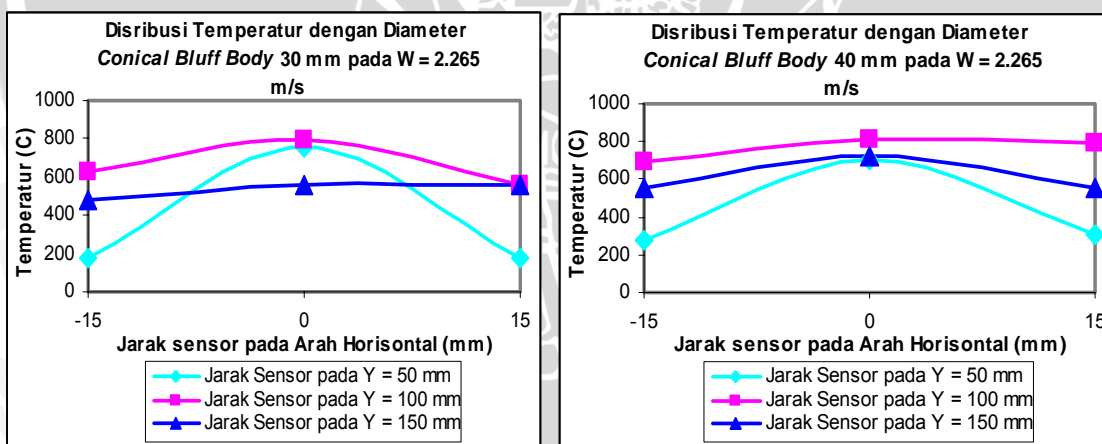
#### 4.3.4 Grafik distribusi temperatur dengan variasi diameter *conical bluff body*

1. Grafik distribusi temperatur pada  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



(a) Tanpa *conical bluff body*

(b) Diameter *conical bluff body* 20 mm



(c) Diameter *conical bluff body* 30 mm

(d) Diameter *conical bluff body* 40 mm

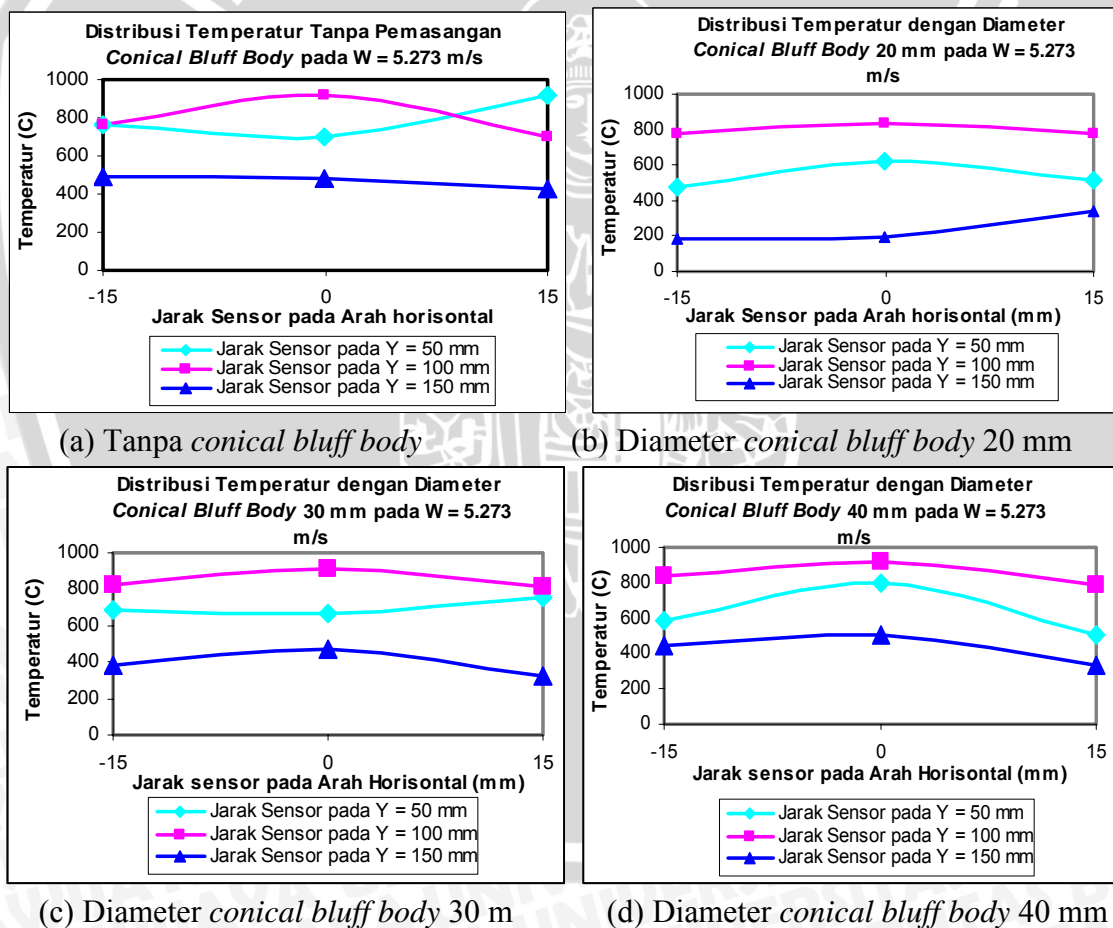
Gambar 4.4 Grafik distribusi temperatur pada arah aksial dengan  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

Gambar 4.4 (a), (b), (c) dan (d) menunjukkan hubungan antara distribusi temperatur berbagai variasi penelitian yaitu tanpa pemasangan *conical bluff body*, *conical bluff body* dengan diameter 20 mm, 30 mm dan 40 mm dengan posisi peletakan sensor temperatur pada sumbu  $Y = 50 \text{ mm}$ ,  $Y = 100 \text{ mm}$ , dan  $Y = 150 \text{ mm}$ . Kecepatan

aliran udara aksial  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ , kecepatan aliran bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ .

Pada gambar 4.4 pemasangan *conical bluff body* tidak begitu terlihat pengaruhnya. Pada pemasangan tanpa *conical bluff body* (gambar 4.4 (a)) memiliki distribusi temperatur yang paling baik dibanding dengan pemasangan *conical bluff body*, karena pada kecepatan tersebut dimungkinkan terjadinya pemanasan awal akibat dari kecepatan yang dihasilkan relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan pemasangan *conical bluff body* sehingga reaktan memiliki cukup waktu untuk menerima panas. Pemanasan awal tersebut mengakibatkan molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin baik sehingga temperatur dapat terdistribusi dengan merata.

## 2. Grafik distribusi temperatur pada $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.5 Grafik distribusi temperatur pada arah aksial dengan  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

Secara umum terlihat bahwa grafik pada gambar 4.5 memiliki temperatur yang lebih terdistribusi dengan merata bila dibandingkan dengan grafik pada gambar 4.4 hal



tersebut dapat dilihat pada grafik dengan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  menunjukkan garis yang lebih datar yang artinya temperatur pada arah horisontal memiliki gradien temperatur yang tidak begitu besar. Hal tersebut disebabkan karena kecepatan udara tangensial ( $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$ ) dapat menimbulkan turbulensi yang cukup sehingga bahan bakar dan udara pembakaran dapat tercampur dengan lebih baik.

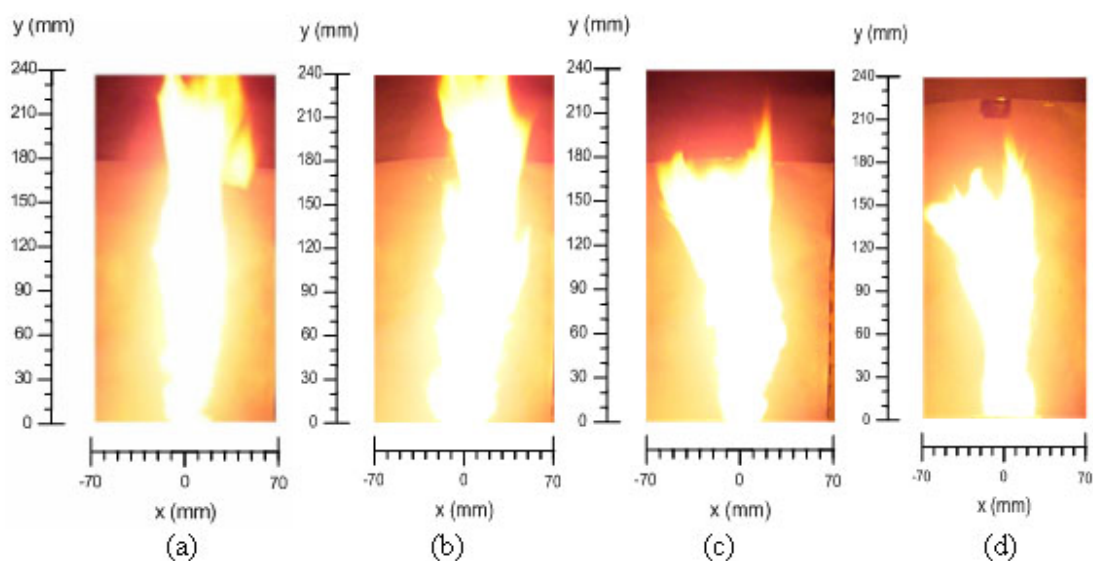
Pada kecepatan udara tangensial  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  temperatur api sedikit lebih tinggi bila dibandingkan dengan kecepatan udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  disebabkan adanya resirkulasi yang baik pada jarak tersebut ( $Y = 100 \text{ mm}$ ) sehingga terdapat transfer panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar), sehingga pembakaran berlangsung lebih mendekati sempurna. Hal ini mengakibatkan temperatur yang dihasilkan juga semakin tinggi. Temperatur tinggi tersebut mengindikasikan tempat berlangsungnya proses pembakaran. Secara keseluruhan temperatur terendah cenderung terjadi pada jarak  $y = 150 \text{ mm}$ , sedangkan temperatur tertinggi terjadi pada jarak  $y = 100 \text{ mm}$ .

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

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 dilakukan.

Visualisasi api difusi *annulus jet* dari hasil pengamatan adalah sebagai berikut:

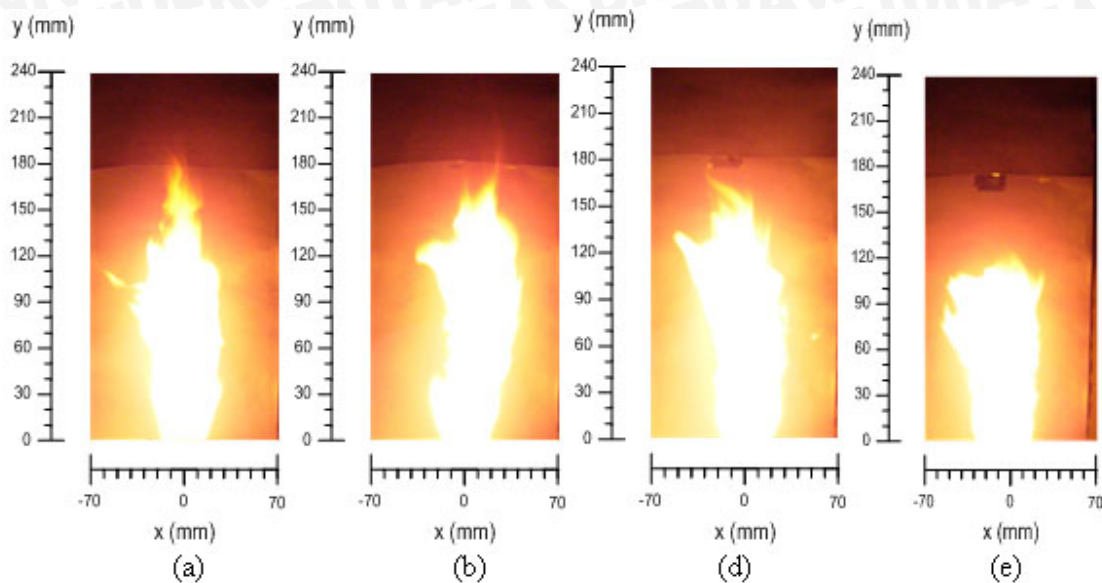
1. Pada kecepatan bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.6 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *conical bluff body*

- (a) Tanpa *conical bluff body* (b) Diameter 20 mm  
(c) Diameter 30 mm (d) Diameter 40 mm

2. Pada kecepatan bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

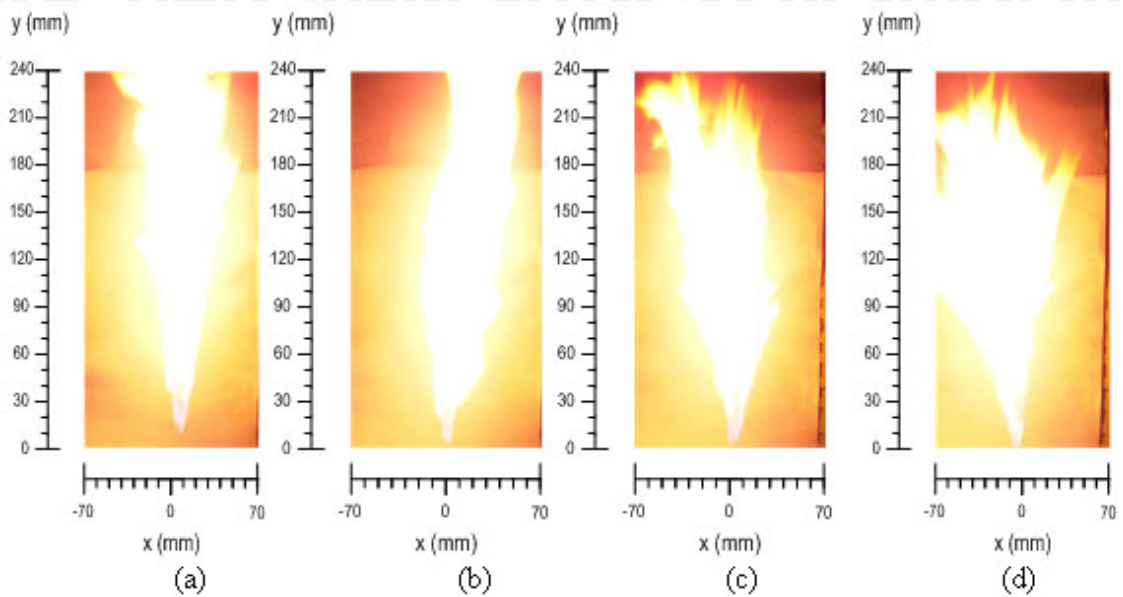


Gambar 4.7 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *conical bluff body*  
 (a) Tanpa *conical bluff body* (b) Diameter 20 mm  
 (c) Diameter 30 mm (d) Diameter 40 mm

Pada Gambar 4.6 terlihat visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *conical bluff body* dengan kecepatan aliran bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  serta kecepatan aliran udara tangensial  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ . Sedangkan gambar 4.7 visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *conical bluff body* dengan kecepatan aliran bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  serta kecepatan aliran udara tangensial  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$ .

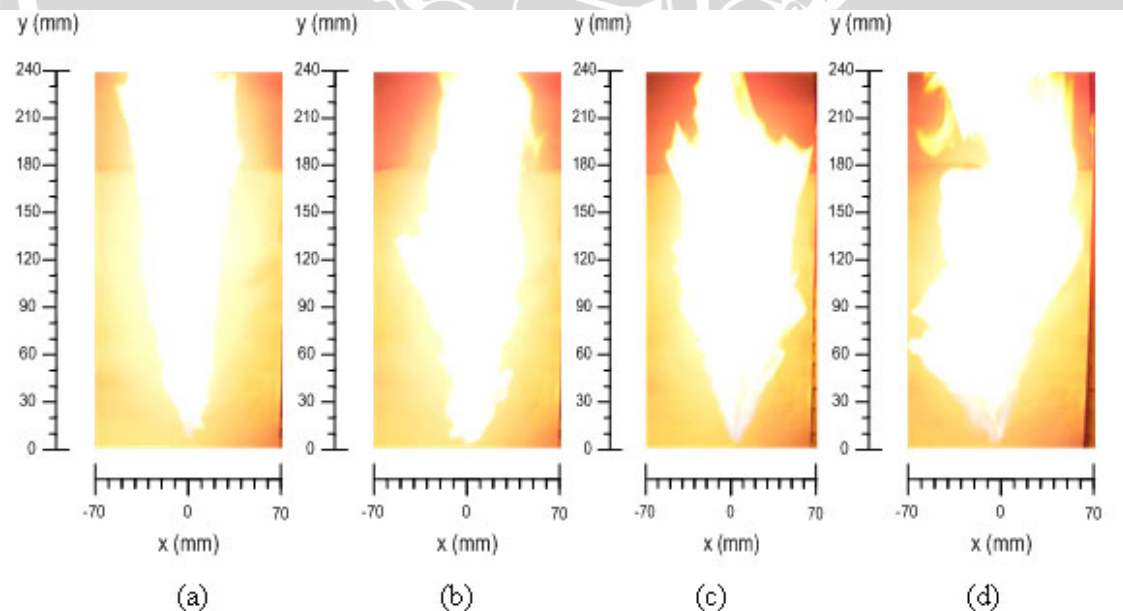
Dari gambar terlihat bahwa panjang api pada gambar 4.7 lebih pendek dari gambar 4.6, hal ini dikarenakan pengaruh pemasangan *conical bluff body* sehingga mampu menghasilkan aliran turbulen yang besar. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi, sehingga api mengalami pemendekan. Namun hampir seluruh api (pada gambar 4.7) memiliki panjang dan tebal yang hampir sama antara tanpa pemasangan *conical bluff body* dan dengan menggunakan *conical bluff body*. Hal tersebut disebabkan efek aliran *swirl* yang dihasilkan oleh udara tangensial tidak begitu berpengaruh akibat adanya *conical bluff body*. Pemasangan *conical bluff body* mengakibatkan pola aliran yang dihasilkan udara tangensial berubah karena udara tersebut harus melalui luasan yang lebih sempit.

3. Kondisi *lift off* pada kecepatan bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$ .



Gambar 4.8 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi diameter *conical bluff body*  
 (a) Tanpa *conical bluff body*,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 4,252 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$   
 (b) Diameter 20 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 5,553 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$   
 (c) Diameter 30 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 4,299 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$   
 (d) Diameter 40 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 8,080 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$

4. Kondisi *lift off* pada kecepatan bahan bakar  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.9 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi diameter *conical bluff body*  
 (a) Tanpa *conical bluff body*,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 12,926 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$   
 (b) Diameter 20 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 16,265 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$   
 (c) Diameter 30 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 16,292 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$   
 (d) Diameter 40 mm,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 17,376 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

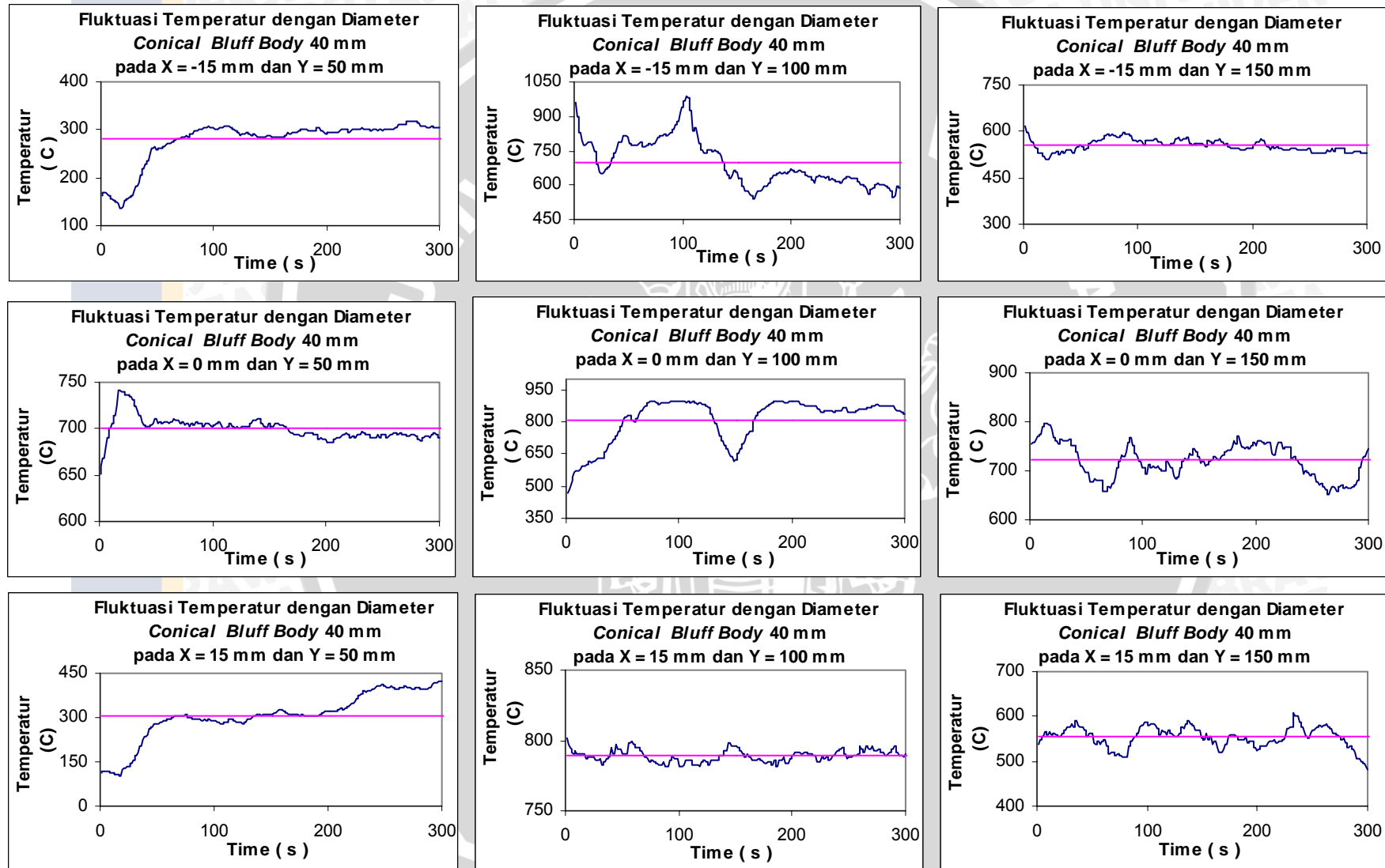
Pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 memperlihatkan visualisasi api *lift off* pada kecepatan aliran udara tangensial adalah  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$ , dengan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$ .

Saat kondisi *lift off*, struktur api secara umum lebih turbulen dari pada saat kondisi stabil. Hal ini disebabkan karena semakin besarnya diameter *conical bluff body*, akan membuat aliran lebih turbulen sehingga *shear flow* akan meningkat, akibatnya zona resirkulasi dan proses difusi akan meningkat yang berarti bahwa pembakaran semakin mendekati sempurna akibatnya *lift off* makin sulit terjadi. 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 kecepatan bahan bakar 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).

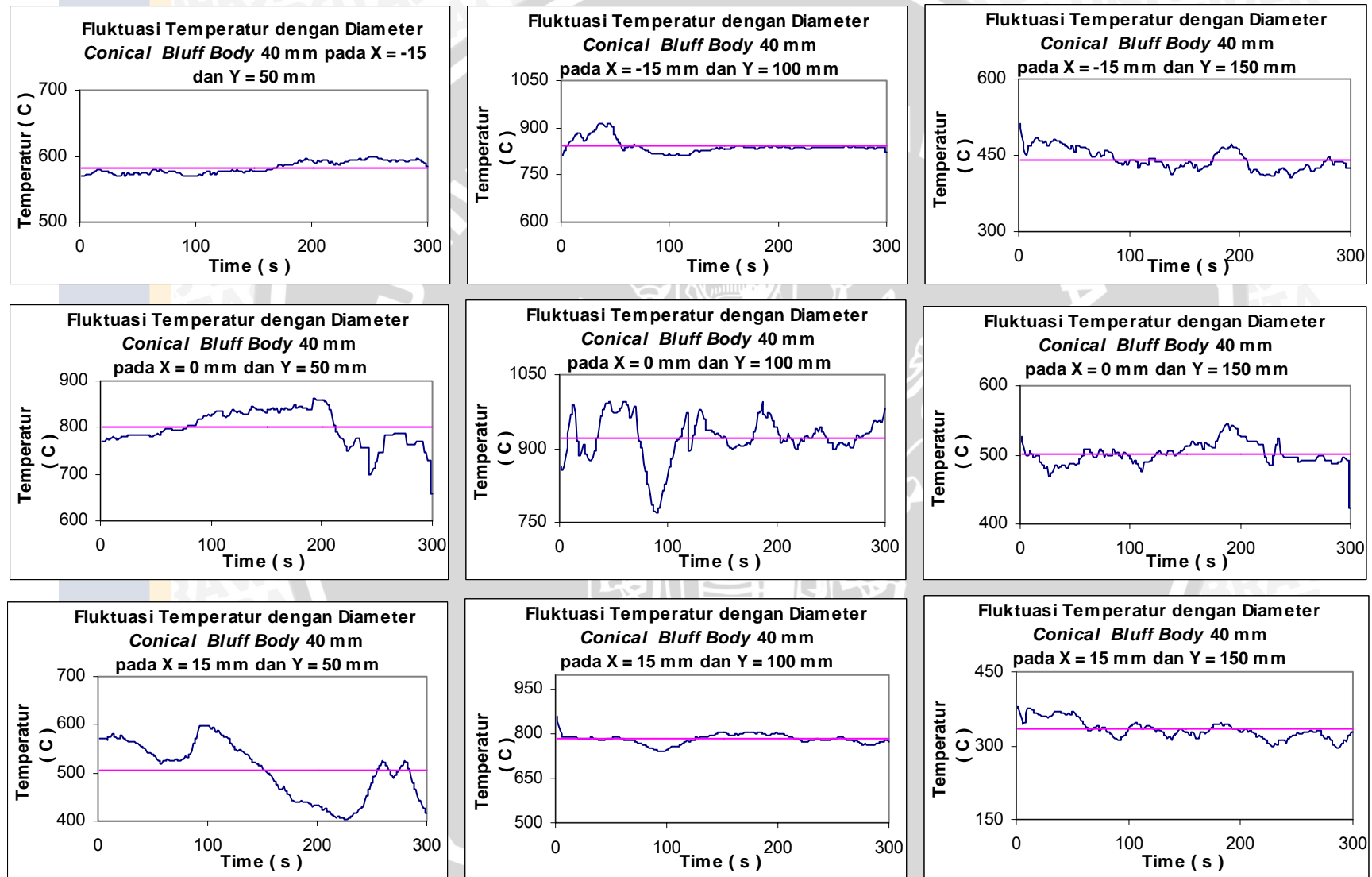
#### 4.5. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet*

Grafik fluktuasi temperatur dari data yang diperoleh secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 10 s/d 17. Grafik berikut merupakan grafik fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 40 mm dimana sumbu X mengindikasikan waktu sedangkan sumbu Y adalah temperatur yang terukur pada sensor.

Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan grafik fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 40 mm pada  $y = 50 \text{ mm}$ ,  $y = 100 \text{ mm}$  dan  $y = 150 \text{ mm}$  dengan  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  pada gambar 4.11.



Gambar 4.10 Fluktuasi temperatur pada  $y = 50 \text{ mm}$ ,  $y = 100 \text{ mm}$  dan  $y = 150 \text{ mm}$ .  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,0581 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.11. Fluktuasi temperatur pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318$  m.s<sup>-1</sup>,  $U = 1,0581$  m.s<sup>-1</sup> dan  $W = 5,273$  m.s<sup>-1</sup>

Pada pemasangan *conical bluff body* untuk aliran udara tangensial yang rendah  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $Y = 50 \text{ mm}$  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. Hal ini dikarenakan karena pada posisi tersebut terjadi aliran resirkulasi yang cukup baik sehingga mengakibatkan proses difusi dan homogenitas campuran bahan bakar dan udara lebih baik. Pada posisi sensor temperatur yang paling jauh dari nosel bahan bakar  $y = 150 \text{ mm}$ , terdapat beberapa sensor yang tidak terkena api akibat adanya *shear flow* sehingga api menjadi lebih pendek. Tidak semua pemakaian variasi *conical bluff body* memiliki kecenderungan yang sama, karena tingkat turbulensi yang sangat berpengaruh dalam menentukan intensitas fluktuasi.

Secara keseluruhan fluktuasi temperatur dipengaruhi oleh tingkat *eddy scale*, fluktuasi akan semakin berkurang jika *small eddy scale* yang mempengaruhi gerakan api semakin besar, baik pada aliran udara maupun langsung pada gerakan apinya, sehingga kestabilan apinya juga semakin meningkat. *Small eddy scale* terjadi jika kecepatan reaktan rendah dengan kata lain turbulensi yang terjadi tidak terlalu tinggi, sedangkan *large eddy scale* dipengaruhi oleh turbulensi yang sangat tinggi sehingga semakin banyak reaktan yang bersirkulasi akibat aliran turbulen, sehingga temperatur yang terukur oleh sensor adalah reaktan yang belum terbakar.

Pada saat temperatur yang terukur berada di bawah temperatur rata-rata data, berarti terdapat aliran reaktan masuk ke dalam api, sehingga temperatur reaktan 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 aliran udara tangensial yang tinggi  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $Y = 50 \text{ mm}$ , temperatur pada bagian tengah api dan tepi api cenderung konstan. Sedangkan pada  $X = 0$  temperatur cenderung fluktuatif karena gerakan api dipengaruhi oleh *small eddy scale* dan *large eddy scale* pada aliran udara.

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

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

- Daerah kestabilan nyala api difusi *annulus jet* terbesar diperoleh pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 40 mm.
- Temperatur api difusi *annulus jet* terdistribusi merata ke arah horisontal pada  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$  terjadi pada tanpa pemasangan *conical bluff body* sedangkan untuk  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$  distribusi temperatur api yang paling baik terjadi pada pemasangan *conical bluff body* dengan diameter 40 mm.

### 5.2. Saran

Merujuk dari penelitian yang telah dilakukan, untuk penelitian selanjutnya dapat diteliti lebih mendalam mengenai:

1. Kombinasi antara aliran udara tangensial dan *bluff body* dengan menggunakan bentuk geometri yang berbeda sehingga dapat diketahui seberapa besar pengaruh sistem kombinasi itu terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *annulus jet*.
2. Menggunakan lebih banyak *thermocouple* agar diperoleh data distribusi temperatur api dengan lebih baik.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pemasangan *bluff body* terhadap karakteristik pola aliran fluida yang terjadi.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan lebih banyak variasi diameter *conical bluff body*, kecepatan aliran bahan bakar maupun dengan menggunakan diameter saluran bahan bakar yang lebih besar.



## DAFTAR PUSTAKA

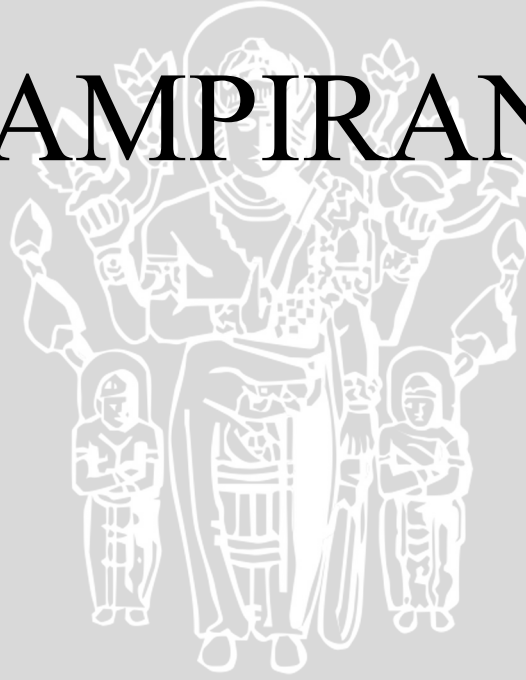
- Bahawan, J., 2002, *Pengaruh Dimensi Disc Bluff Body Terhadap Waktu Penyalaan Pada Awal Pembakaran*, Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang. (Tidak dipublikasikan)
- Borman, G., 1998, *Combustion Engineering*, Wisconsin: McGraw-Hill
- Culp, Archie W., 1996. *Prinsip-prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga
- Hifni, Mohammad, 1990, *Metode Statistika*, Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Hizbullah, M., 2006, *Pengaruh Variasi Sudut Inklinasi Tangential Air Jet Inlets terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Pada Api Difusi Annulus Jet*, Skripsi, Malang: Universitas Brawijaya.
- <http://www.pertamina.com>.
- <http://www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html>.
- Kuo K, 1986, *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Lilley, David G, 1977, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA.
- Longwell, John. P., et al, 2000, *Flame Stability in Bluff Body Recirculation Zones*: Journal of Combustion.
- Masri, A. R., et al, 2000, *Strongly Swirling Nonpremixed Flame Stabilized on New Burner* : Journal of Combustion.
- Milton, Brian E, 1995, *Thermodynamics, Combustion and Engines*, London :Chapman & Hall.
- Monnot, G., et al, 1985, *Principles of Turbulent Fired Heat*, Texas: Gulf Publishing Company.
- Peters, N, 1997, *Four Lectures on Turbulent Combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Potter, C. P., David, C. W. dan Midhat, Hondzo, 1997, *Mechanics of fluids*, Singapore: Prentice – Hall, Inc.
- Rathakrisnan, E, 1994, *Fluid Mechanic-An Introduction*, New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited.
- Raman, V, 2005, *Large-eddy Simulation of A Bluff Body Stabilized Non-Premixed Flame Using a Recursive Filter Refinement Prosedure*.
- [http://www.stanford.edu/group/pitsch/publication/RamanCF\\_142\\_2005.pdf](http://www.stanford.edu/group/pitsch/publication/RamanCF_142_2005.pdf)

- Rohmat, T.A., et al, 1998, *Diffusion Flame Stabilized on a Porous Plate in a Paralel Airstream*, AIAA Journal.
- Rocket Propulsion Lab, 2004, *Bluff-body Stabilized Flame*, Seoul National University Rocket Propulsion Lab, Korea.
- Sudjana, Andi, 2001, *Pengaruh Kecepatan Udara Pembakaran terhadap Terbakarnya Bahan Bakar pada Awal Pembakaran*, Skripsi, Malang: Universitas Brawijaya.
- Takahashi, F., et al., 1996, *Structure of Turbulent Hydrogen Jet Diffusion Flames With or Without Swirl*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Takahashi, F., et al., 1998, *Turbulence Structure of Swirling Hydrogen Jet Diffusion Flames*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : McGraw-Hill, Inc.
- Wardana, I. N. G., 1995, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wijayanti I, W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

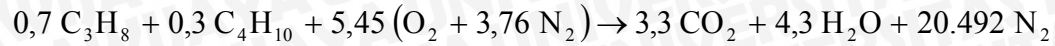
# LAMPIRAN



Lampiran 1. Perhitungan 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 (kg.kg <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )	Massa Jenis (kg.m <sup>-3</sup> )
Udara		28,97	1,208
Propana	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,099	1,887
<i>n</i> -Butana	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,126	2,495

Sumber: Culp, 1996: 468

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

$$\text{Berat Molekul bahan bakar} = 0,7 (44,099) + 0,3 (58,126) = 48,3071 \text{ kg.kg}^{-1}.\text{kmol}^{-1}$$

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

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

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

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

$$\text{Volume gas spesifik} = v = \frac{R.T}{P} = \frac{R_u.T}{P(MW)} \quad (\text{Culp,1996: 51})$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{(0,08315 \text{ bar.m}^3 \text{.kg}^{-1} \text{.mol}^{-1} \text{.K}^{-1})(300 \text{ K})}{(1 \text{ atm})(1,0133 \text{ bar.atm}^{-1})(48,3071 \text{ kg.kg}^{-1} \text{.mol}^{-1})} \\ &= 0,4999 \text{ m}^3 \text{.kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = 2,009 \text{ kg.m}^{-3}$$

Lampiran 2. Data hasil penelitian dengan tanpa *conical bluff body*

$\Delta H$ Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i>		$\Delta H$ Manometer Udara Aksial		Bahan Bakar					
$\Delta H$ (mmHg)	m/s	$\Delta H$ (mmMinyak)	m/s	<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
				$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$	$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$
2	0.824	25	1.0581	2	1.188	1.397	140	12.139	12.401
				2	1.188		148	12.448	
				4	1.711		150	12.523	
				2	1.188		146	12.372	
				4	1.711		150	12.523	
4	2.265	25	1.0581	20	4.204	4.252			
				22	4.442				
				20	4.204				
				20	4.204				
				20	4.204				
6	3.784	25	1.0581	80	9.203	9.251			
				82	9.323				
				80	9.203				
				80	9.203				
				82	9.323				
8	5.273	25	1.0581	160	12.884	12.926			
				164	13.023				
				162	12.954				
				160	12.884				
				160	12.884				
10	6.700	25	1.0581	300	16.207	16.225			
				300	16.207				
				302	16.237				
				304	16.266				
				300	16.207				

Lampiran 3. Data hasil penelitian dengan *conical bluff body* 20 mm

$\Delta H$ Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i>		$\Delta H$ Manometer Udara Aksial		Bahan Bakar					
$\Delta H$ (mmHg)	m/s	$\Delta H$ (mmMinyak)	m/s	<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
				$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$	$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$
2	0.824	25	1.0581	60	7.881	7.425			
				60	7.881				
				50	7.121				
				50	7.121				
				50	7.121				
4	2.265	25	1.0581	30	5.318	5.553			
				36	5.907				
				30	5.318				
				30	5.318				
				36	5.907				
6	3.784	25	1.0581	220	14.651	14.446			
				200	14.130				
				210	14.398				
				220	14.651				
				210	14.398				
8	5.273	25	1.0581	300	16.207	16.265			
				300	16.207				
				310	16.352				
				310	16.352				
				300	16.207				
10	6.700	25	1.0581	450	17.483	17.472			
				448	17.477				
				444	17.464				
				446	17.471				
				444	17.464				

Lampiran 4. Data hasil penelitian dengan *conical bluff body* 30 mm

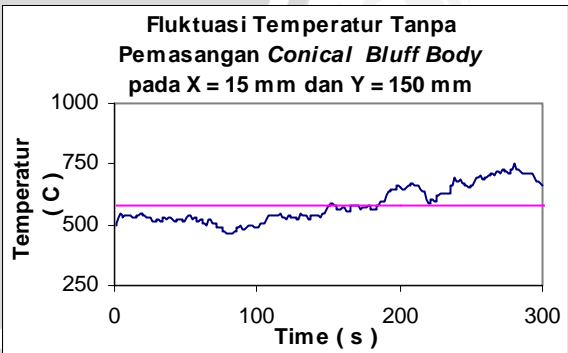
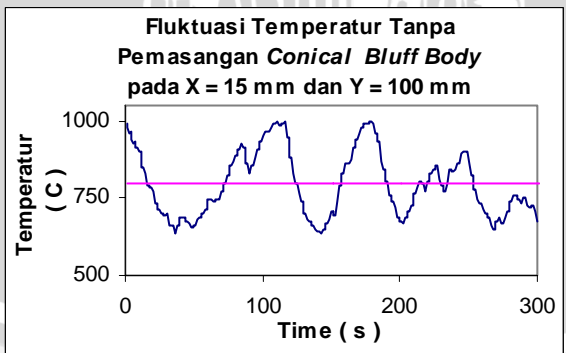
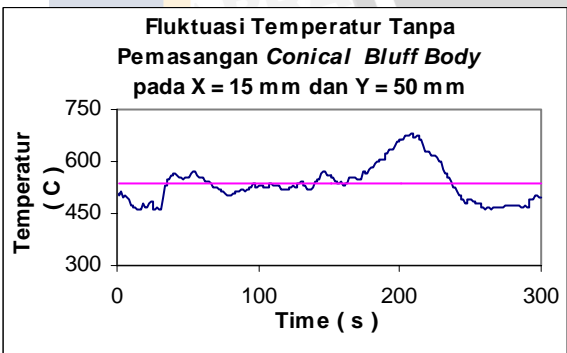
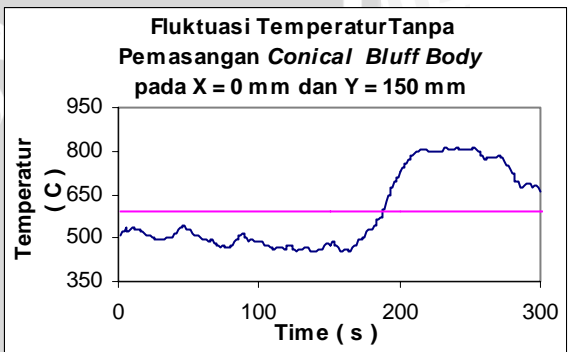
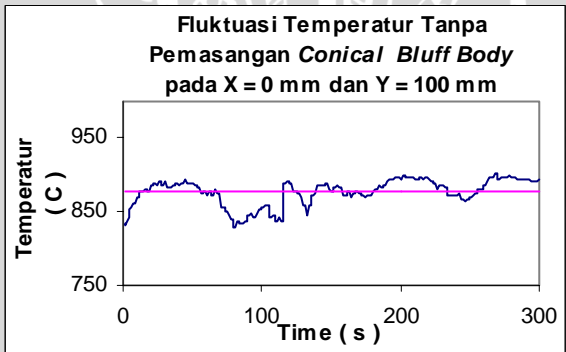
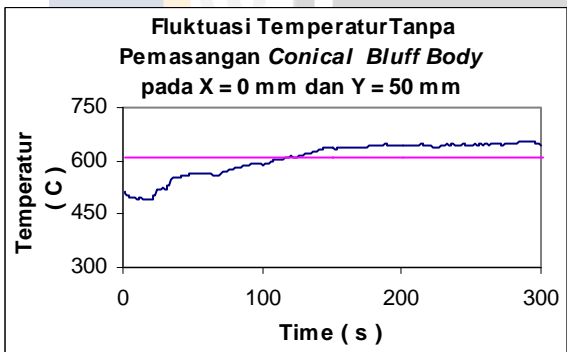
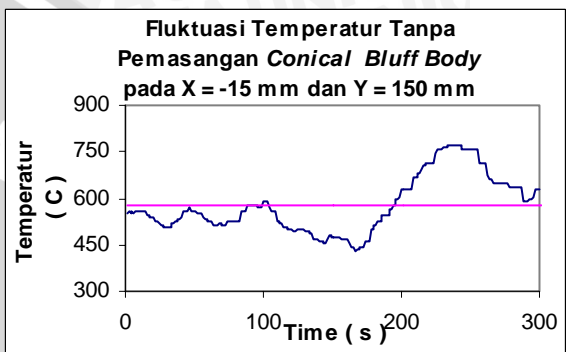
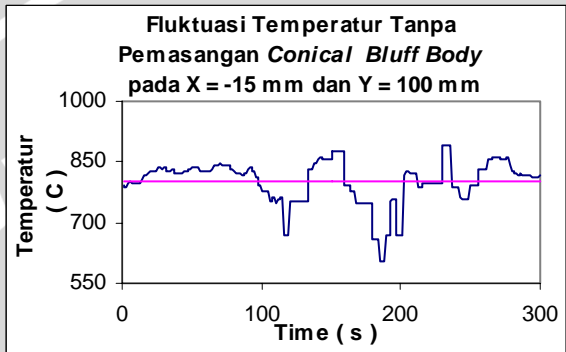
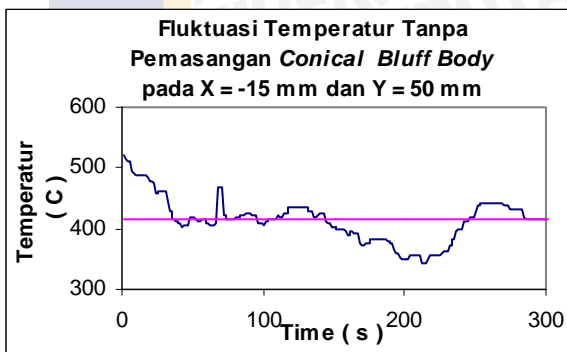
$\Delta H$ Manometer <i>Tangential Air Jet</i> <i>Inlets</i>		$\Delta H$ Manometer Udara Aksial		Bahan Bakar					
$\Delta H$ (mmHg)	m/s	$\Delta H$ (mmMinyak)	m/s	<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
				$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$	$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$
2	0.824	25	1.0581	24	4.672	4.849	70	8.571	8.570
				28	5.109		68	8.438	
				26	4.894		70	8.571	
				26	4.894		74	8.830	
				24	4.672		68	8.438	
4	2.265	25	1.0581	20	4.204	4.299	330	16.611	16.577
				20	4.204		320	16.486	
				22	4.442		328	16.587	
				20	4.204		328	16.587	
				22	4.442		330	16.611	
6	3.784	25	1.0581	120	11.292	11.346			
				122	11.382				
				120	11.292				
				122	11.382				
				122	11.382				
8	5.273	25	1.0581	300	16.207	16.292			
				310	16.352				
				320	16.486				
				300	16.207				
				300	16.207				
10	6.700	25	1.0581	426	17.393	17.409			
				430	17.411				
				434	17.427				
				430	17.411				
				428	17.402				

Lampiran 5. Data hasil penelitian dengan *conical bluff body* 40 mm

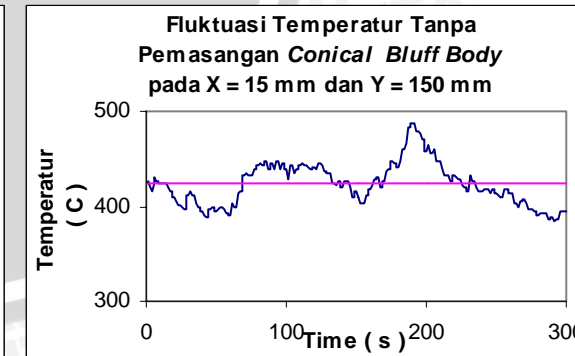
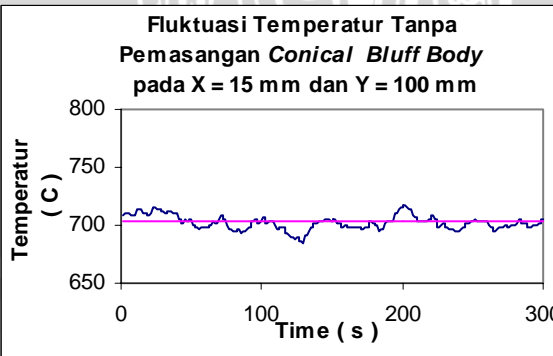
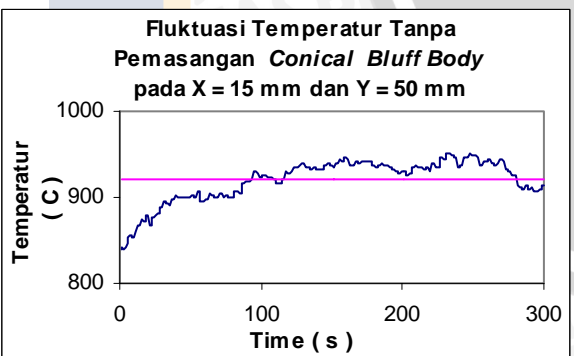
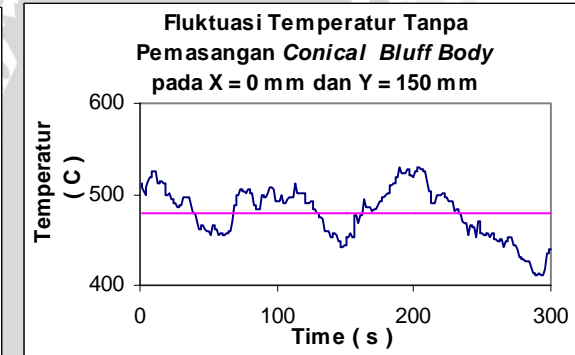
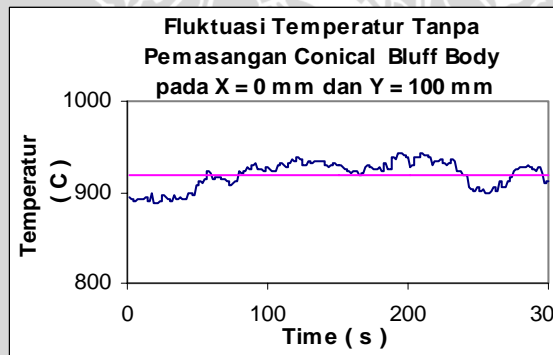
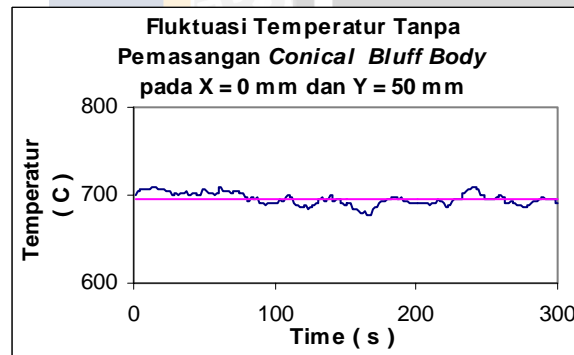
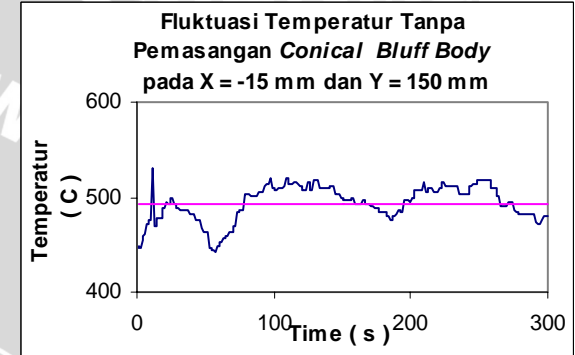
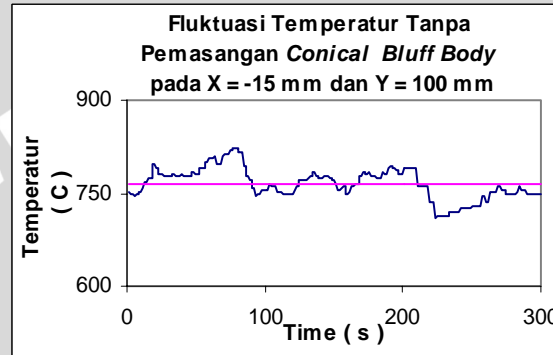
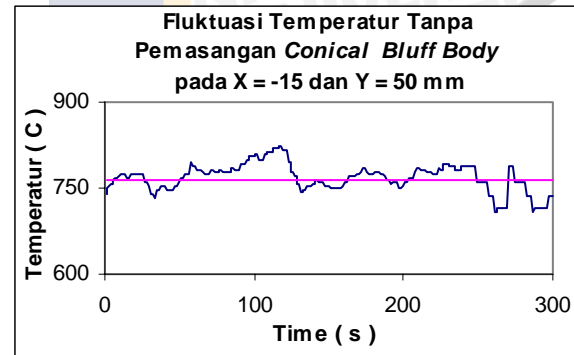
$\Delta H$ Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i>		$\Delta H$ Manometer Udara Aksial		Bahan Bakar					
$\Delta H$ (mmHg)	m/s	$\Delta H$ (mmMinyak)	m/s	<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
				$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$	$\Delta H$ (mmHg)	V (m/s)	$\bar{X}$
2	0.824	25	1.0581	80	9.203	9.178	140	12.139	12.217
				78	9.081		142	12.217	
				80	9.203		140	12.139	
				80	9.203		142	12.217	
				80	9.203		146	12.372	
4	2.265	25	1.0581	60	7.881	8.080			
				64	8.165				
				64	8.165				
				64	8.165				
				62	8.024				
6	3.784	25	1.0581	180	13.544	13.617			
				180	13.544				
				186	13.727				
				186	13.727				
				180	13.544				
8	5.273	25	1.0581	420	17.364	17.376			
				424	17.384				
				420	17.364				
				426	17.393				
				422	17.374				
10	6.700	25	1.0581						



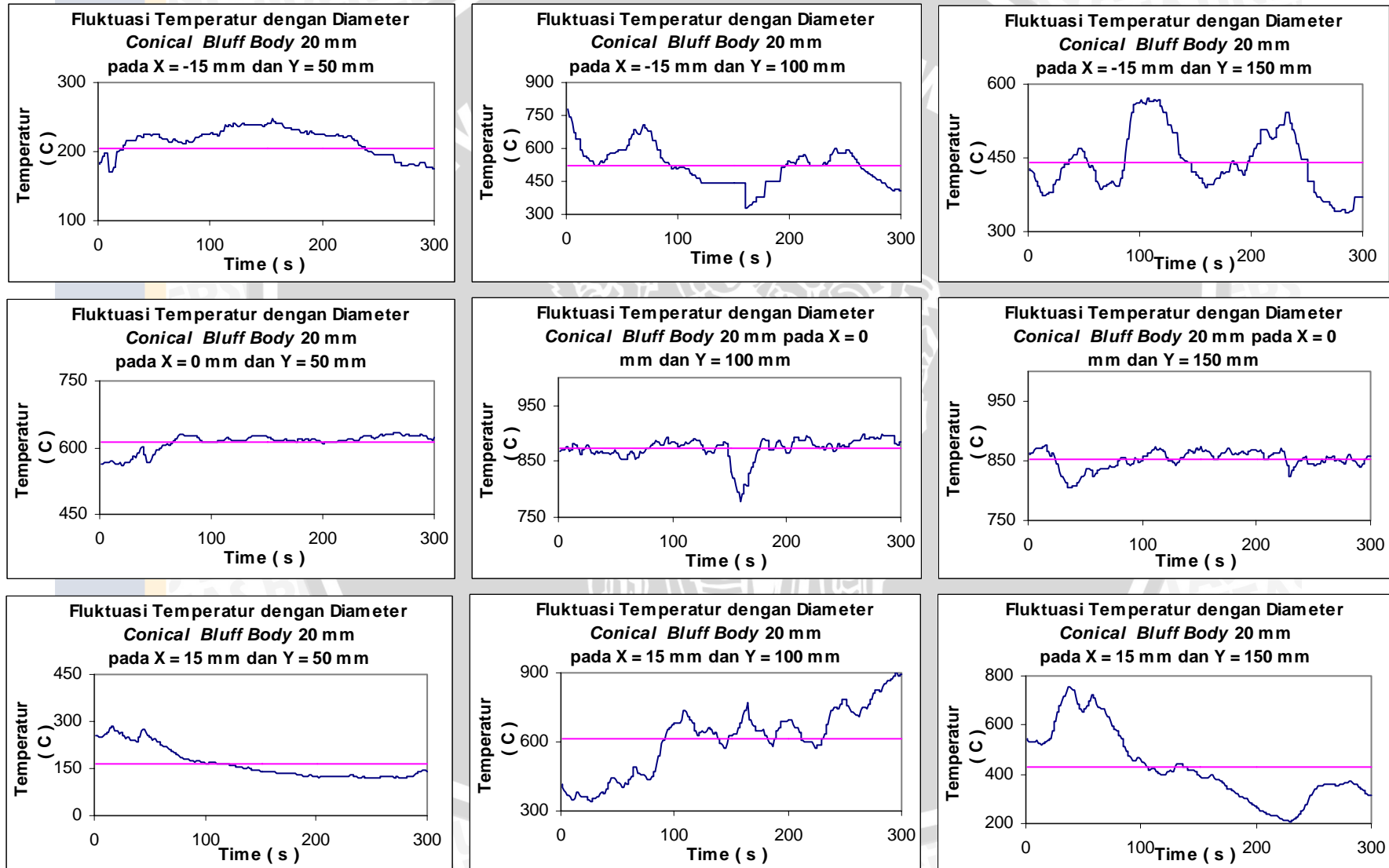
Lampiran 6. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan tanpa pemasangan *conical bluff body* pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm,  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



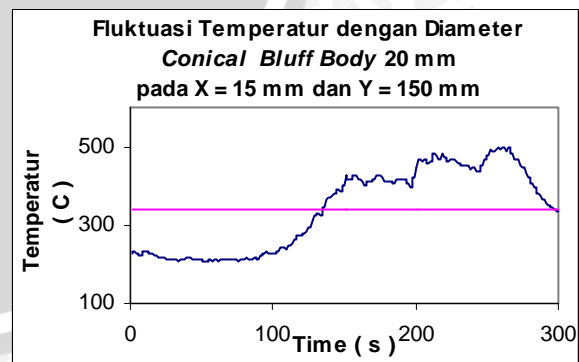
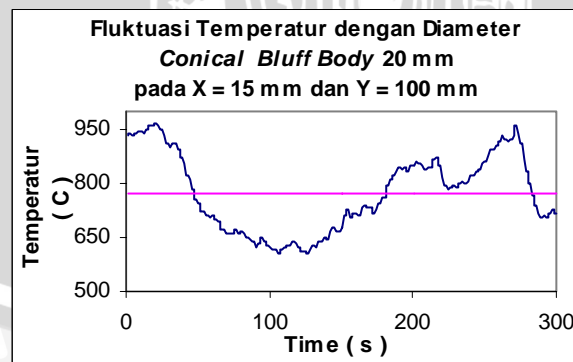
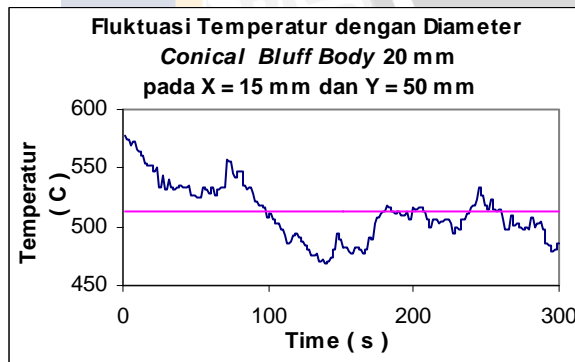
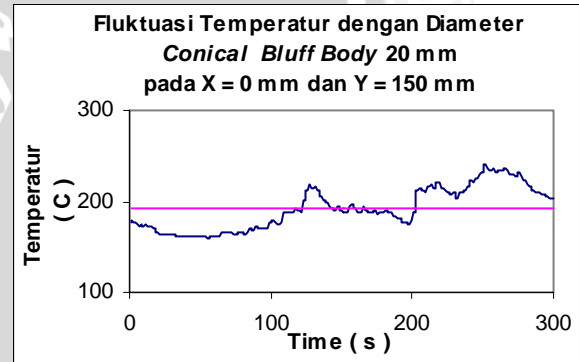
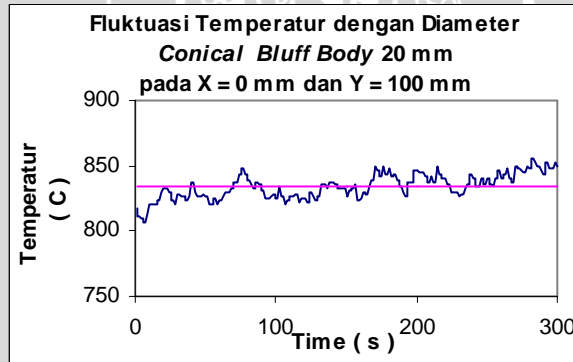
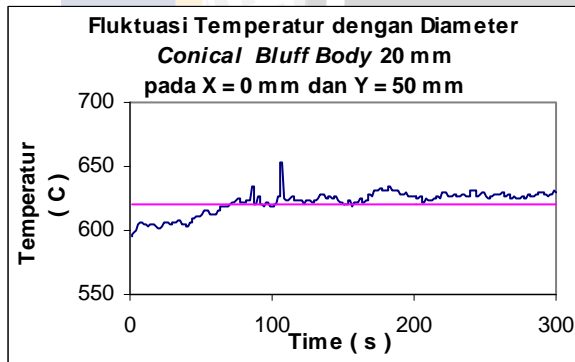
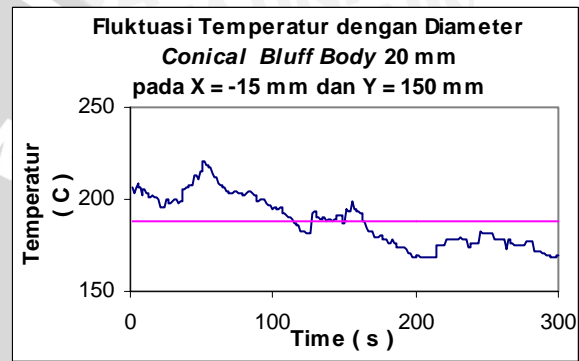
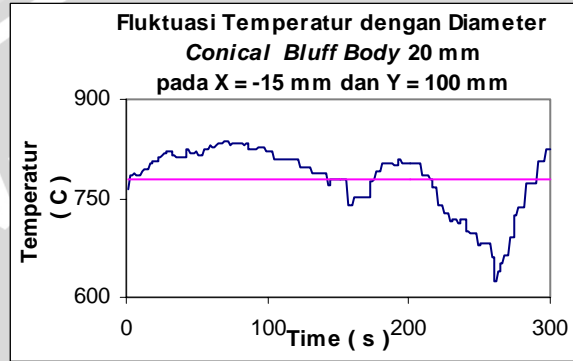
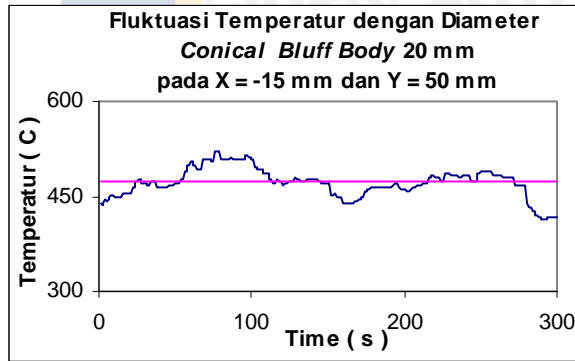
Lampiran 7. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan tanpa pemasangan *conical bluff body* pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm,  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



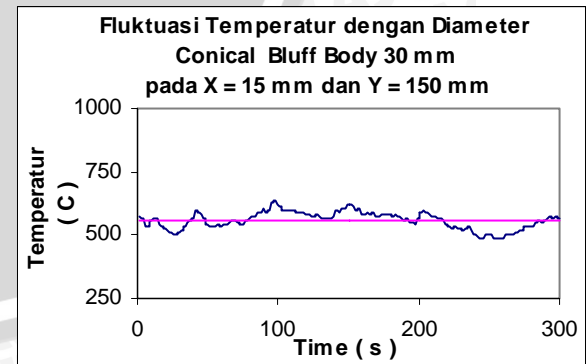
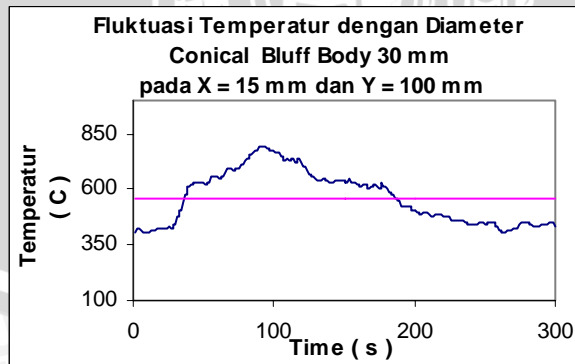
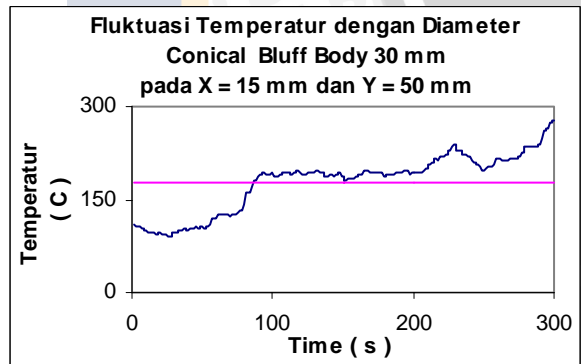
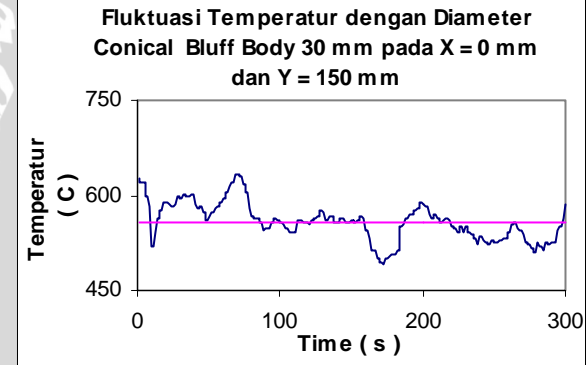
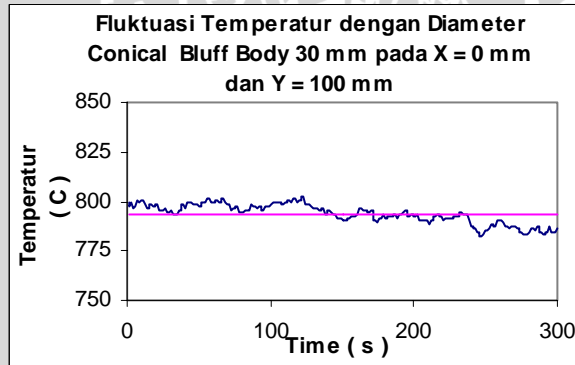
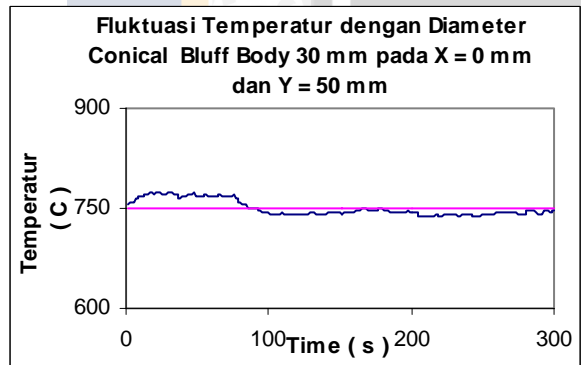
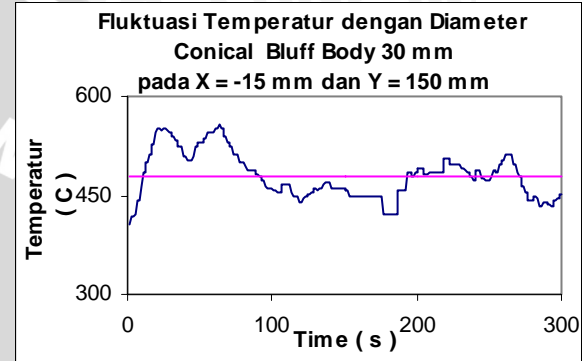
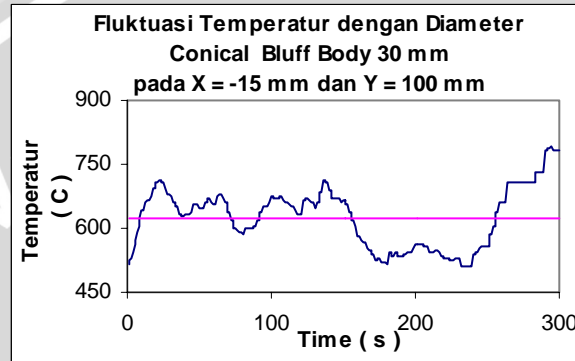
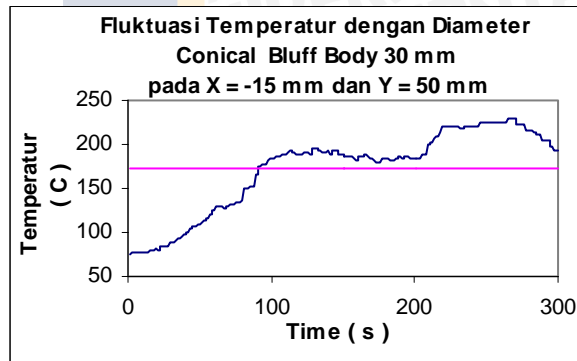
Lampiran 8. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 20 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



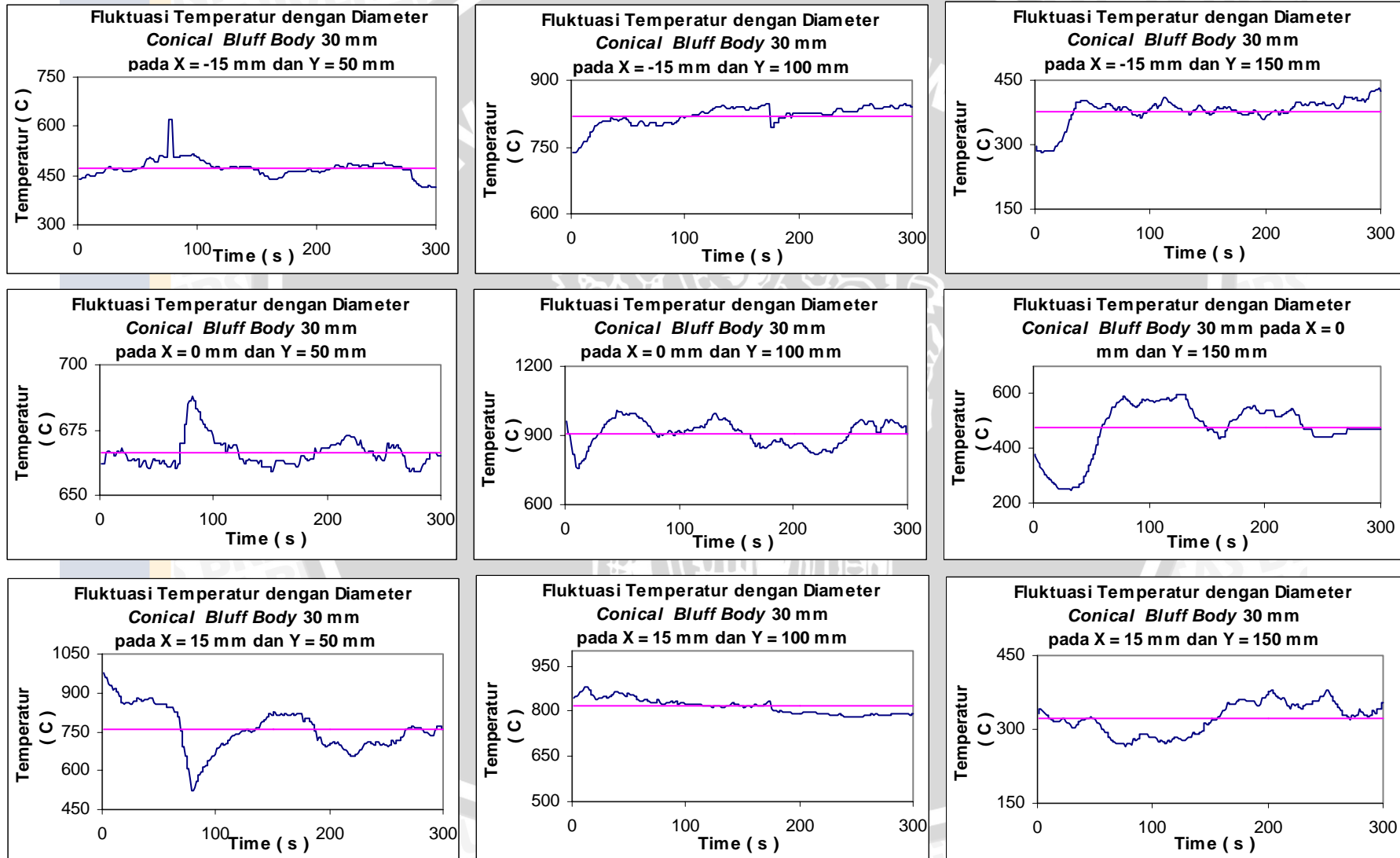
Lampiran 9. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 20 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



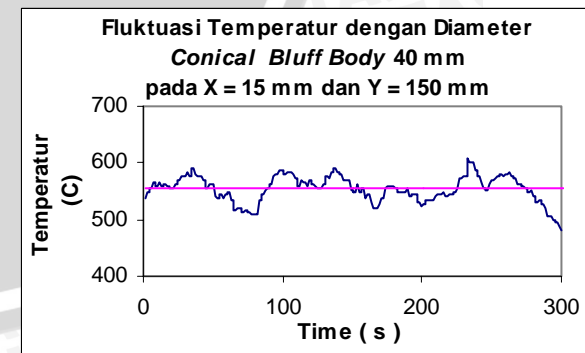
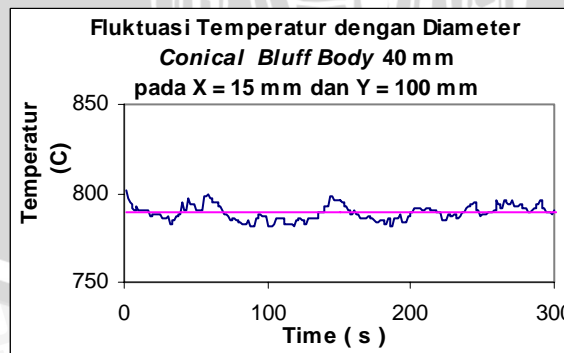
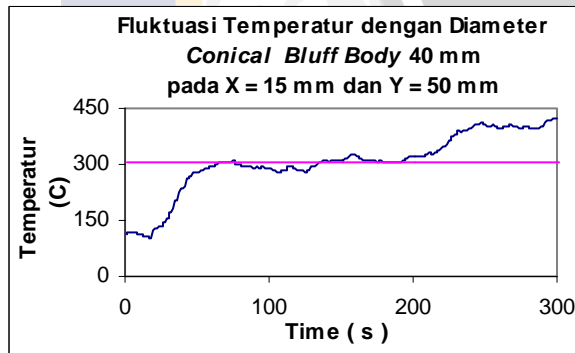
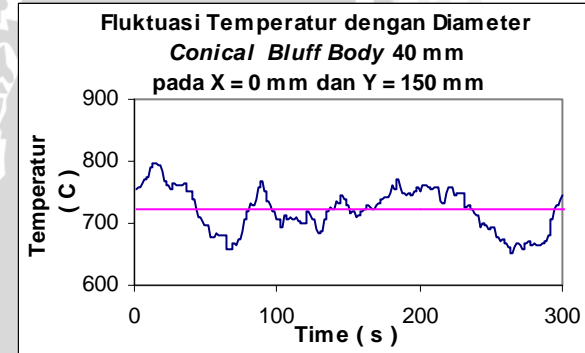
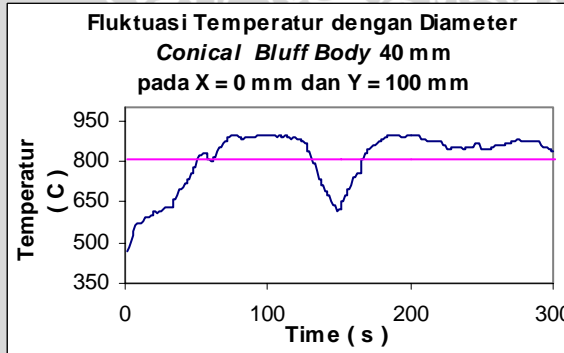
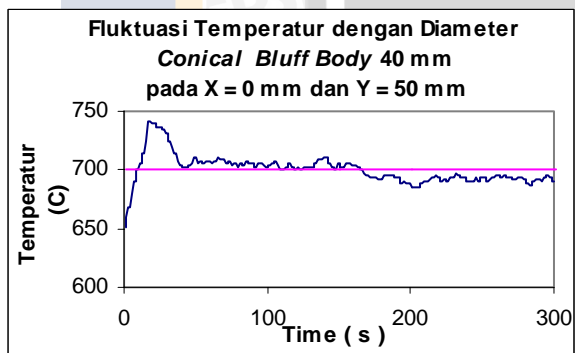
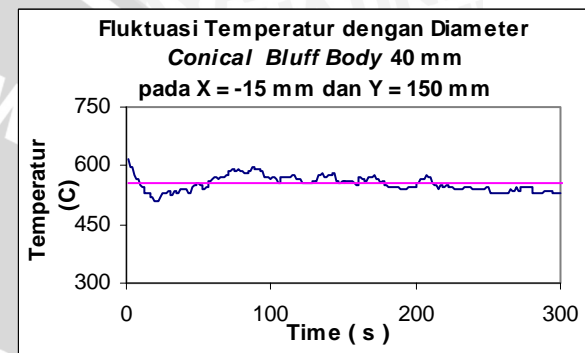
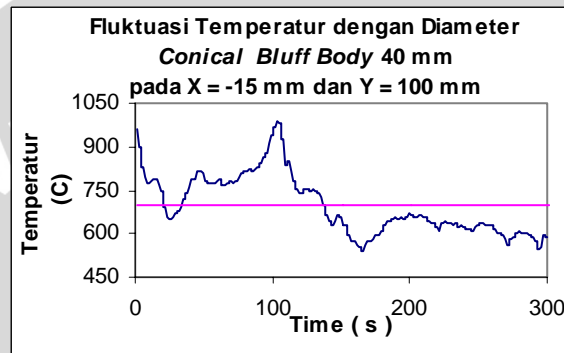
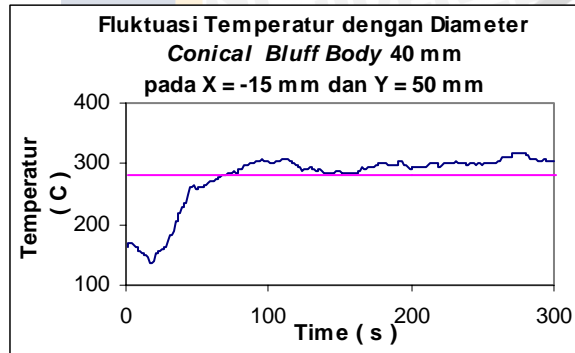
Lampiran 10. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 30 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 11. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 30 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 12. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 40 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 13. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *conical bluff body* 40 mm pada  $y = 50$  mm,  $y = 100$  mm dan  $y = 150$  mm.  $V = 5,318 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $U = 1,023 \text{ m.s}^{-1}$  dan  $W = 5,273 \text{ m.s}^{-1}$

