

**PENGARUH VARIASI SUDUT INKLINASI
TANGENTIAL AIR JET INLETS TERHADAP
KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
API DIFUSI ANNULUS JET**

SKRIPSI

Konsentrasi Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

MALIK HIZBULLAH

NIM. 0210623045-62

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2007

**PENGARUH VARIASI SUDUT INKLINASI
TANGENTIAL AIR JET INLETS TERHADAP
KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
API DIFUSI ANNULUS JET**

SKRIPSI

Konsentrasi Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

MALIK HIZBULLAH
NIM. 0210623045-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

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

**PENGARUH VARIASI SUDUT INKLINASI
TANGENTIAL AIR JET INLETS TERHADAP
KESTABILAN NYALA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
API DIFUSI ANNULUS JET**

Disusun oleh :

MALIK HIZBULLAH
NIM. 0210623045-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 17 Januari 2007

DOSEN PENGUJI

SKRIPSI I

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

SKRIPSI II

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

KOMPREHENSIF

Ir. Pratikto, M.MT
NIP. 130 928 864

Mengetahui :
Ketua Jurusan Mesin

Ir. Bambang Indrayadi, MT
NIP. 131 653 469

Special Thanks To



Thanks 4 my God 4ever "Allah SWT" yang selalu melimpahkan karunia, rahmat & hidayahnya serta my idol "Muhammad SAW" yang selalu memberikan petunjuk bagi saya, semoga saya selalu ada di jalanmu dan dapat memberikan yang terbaik bagi umatmu. There is nothing unreachable in this life if we believe that God always give us a power when we're weak and a way when we're lost. Pray and effort are the key of everything.

My Familiy: my mother umi tercinta "Mufarikha", my father "M. Maryadi", my brother & my sister "Ahlul & Nisa". Maafkan aku yang selalu merepotkan, menyusahkan & berbuat banyak kesalahan. Tanpa doa & dukunganmu aku takkan dapat mempersembahkan yang terbaik untukmu my family.

I promise "I will make you happy & I will not dissapoint you".

Thanks 4 everuything

My Best Lecture: Big Boss **Bpk. Slamet Wahyudi, Ibu Widya Wijayanti**, Bpk. Djoko Sutikno, Bpk. Rudy Soenoko, Bpk. Bambang, Bpk. Agung, Ibu Lilis Yuliati, Bpk. Mega, Bpk. Choiron, Bpk. Tjuk, Bpk. Sonief, Bpk. Saefuddin dan semua dosen jurusan Mesin yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu. Bu Hermin, Pak Yoyok, Pak Totok, Pak Supadi, Pak Kuswari, Mas Heru, Bu Ari n et all. Terima kasih banyak atas semua doa, nasehat, bimbingan & ilmu tak ternilai yang Bpk/Ibu berikan. Maafkan semua kesalahan saya selama ini. Semoga Allah SWT membalas semua jasa baik yang telah Bpk/Ibu berikan.

My Best Friends Team CEL (Combustion Engine Laboratory):

Firman (oyo pacaran tok, suwun digambaro & utangane pulsa yo), Zaim (oyo nangis ditinggal ...yo), Masykur (thanks kameranya & kapan2 maen ke Bekasi lg ya), Imam (mam oyo kesusu njaluk rabi kerjo disek, oyo selingkuh, lek mari gatwe kopi dicuci gelase), Galih (ayo cepetan jakete), Wahyu (ati2 sepedae oyo ilang maneh), Wulan (feminin dikit dong), Mas Eko (mas oyo maen game & lihat dangdutan wae) and last My Senior: Endra, Mariono, Arya, Angga, Fuad (Ayo nang Ekonomi & Payung mangan2). Banyak kenangan indah bersamamu yang takkan terlupakan. Thanx 4 everything.

Teman2 seperdjoengan: Habib (ayo cepet lu2s!!, suwun diwangi njupuk data, ayo mangan soto nang FIA), Bambang (oyo dodolan knee, ayo golek sangu nang Jakarta trus ke Jepang), Bang Napi (lek bunuh diri oyo ajak2), Pentol (ayo begadang sama roti bakar), Raditya (suwun kompresore, sukses dulu baru cinta oke), Nawu Wahyu Puput (skripsi koq dodolan es), Akbar (ayo smangat garap), Syamsudin (oyo ngantuk ngambil data), Dadang (oyo nangis lek diplorot), Nanda (oyo emosian yo), Suseno (Nes oyo wedi kompre), Firi (oyo jogo perpustakaan), Diby (ayo golek kerjo oil & gas), Raket (oyo dugem tok), Ririn (ayo garap, oyo ilang wae), Nafi (ayo lari pagi & cuci mata), Bahrul (ayo nglamar kerjo), Irfan (cak Kahim), Donny (ayo golek beasiswa), Somad & Timor (ayo golek kerjo).

"Rocky, Ading, Farouk" (Ayo nang Starbucks Coffee)

Arek2 Remujung & Kumis Kucing: Cpenk, Bienk, Topan, Divie, Rosa, Ruby, Feby, Tatong, Didit, Irwan, Agus, Anang, Budi, Darmanto, Andi Wilis, Ade, Taufik, Kipiling, Aden, Kukuh, Sampekno, Dedi, Steven, arek2 liyane.

(Ayo cepet lu2s!!!, Ayo Klinong2 trus!!!, Ojo kubam tok wae!!!)

Arek2 Divisi Otomotif UB (TGK dan R&D): Yoyok, Mas Fery, Mas Langgeng, Mas Yan, Mas Tyo, Mas Eko, Mas Doddy, Mas Helmy, Mas Bangun, Robbit, Wisnu, Ardhi, Imam, Cahya, Nusron, Ridho, Nanda, Santi, Angie, Rey Dewi, Tossa, Fikri, n et all.

(Ayo latihan Gokart, Ayo maen nang Sentul, Ayo digarap penelitiane)

*Arek2 SMA: Walo, Angga, Erfan, Usman, B'doel.
(Thanx kebersamaan qta slama ini, ayo reuni bareng)*

My Best Prens: Ninun & Supeb

(Ayo cepet mulai penelitian, Non kamu koq maniz banget ce, Berubah dong!!)

Teriring maaf & terima kasih banyak saya ucapkan kepada smuanya, tak terkecuali semua orang yang saya cintai & sayangi tidak saya sebutkan diatas.

Semoga kita sukses dunia & akhirat. Amiiin.



*Itoshi kimi yo... Itoshi kimi yo...
Doکو ni iru no?
Imasugu ai ni kite hoshii
Tatoeba sore ga maboroshii demo
Ii kara*

Pesan Sahabat



Kepada sahabat-sahabatku yang masih LAJANG:

Cinta ibarat kupu-kupu. Makin kau kejar, makin ia menghindar. Tapi bila kau biarkan ia terbang, ia akan menghampirimu disaat kau tak menduganya. Cinta bisa membahagiakanmu tapi sering pula ia menyakiti, tapi cinta itu hanya istimewa apabila kau berikan pada seseorang yang layak menerima. Jadi tenang-tenang saja, jangan terburu-buru dan pilihlah yang terbaik.

Kepada sahabat-sahabatku yang TIDAK BEGITU LAJANG:

Cinta bukannya perkara menjadi "orang sempurna"-nya seseorang. Justru perkara menemukan seseorang yang bisa membantu dirimu menjadi sesempurnanya.

Kepada sahabat-sahabatku yang TIPE PLAYBOY/PLAYGIRL:

Jangan katakan "Aku cinta padamu" bila kau tidak benar-benar peduli. Jangan bicarakan soal perasaan bila itu tidak benar-benar ada. Jangan kau sentuh hidup seseorang bila kau berniat mematahkan hati. Jangan menatap ke dalam mata bila apa yang kau kerjakan cuma berbohong. Hal terkejut yang bisa dilakukan ialah membuat seseorang jatuh cinta, padahal kau tidak berniat sama sekali tuk menerimanya saat ia terjatuh.

Kepada sahabat-sahabatku yang SUDAH MENIKAH:

Cinta bukan urusan "Ini salahmu!", tapi "Maafkan aku, ya?". Bukan "Kau dimana!", melainkan "Aku di sini, kenapa?" Bukan "Kok bisa sih kau begitu!" tapi "Aku ngerti". Dan juga bukan "Coba, seandainya kau..." akan tetapi "Terima kasih ya, kau begitu....."

Kepada sahabat-sahabatku yang BERTUNANGAN:

Tolok ukur saling mencocoki bukanlah berapa lamanya waktu yang kalian habiskan bersama, melainkan untuk berapa saling baiknya anda berdua.

Kepada sahabat-sahabatku yang PATAH HATI:

Sakit patah hati bertahan selama kau menginginkannya dan akan mengiris. Luka sedalam kau membiarkannya. Tantangannya bukanlah bagaimana bisa mengatasi, melainkan apa yang bisa diambil sebagai pelajaran dan hikmahnya.

Kepada sahabat-sahabatku yang NAIIF :

Bagaimana kalau jatuh cinta: Mau jatuh jatuhlah tapi jangan sampai terjerumus, tetaplah konsisten tapi jangan terlalu "ngotot", berbagilah dan jangan sekali-kali tidak fair, berpengertianlah dan cobalah untuk tidak menuntut, siap-siaplah untuk terluka dan menderita, tapi jangan kau simpan semua rasa sakitmu itu.

Kepada sahabat-sahabatku yang MENGUASAI :

Hatimu patah melihat yang kau cintai berbahagia dengan orang lain, tapi akan lebih sakit lagi mengetahui bahwa yang kau cintai ternyata tidak bahagia denganmu.

Kepada sahabat-sahabatku yang TAKUT MENGAKUI :

Cinta menyakitkan bila anda putus hubungan dengan seseorang. Itu malah lebih sakit lagi bila seseorang memutuskan hubungan denganmu. Tapi cinta paling menyakitkan bila orang yang kau cintai sama sekali tidak mengetahui perasaanmu [terhadapnya].



Kepada sahabat-sahabatku yang MASIH BERTAHAN:

Hal menyedihkan dalam hidup ialah bila kau bertemu seseorang lalu jatuh cinta, hanya kemudian pada akhirnya menyadari bahwa dia bukanlah jodohmu dan kau telah menyia-nyiaikan ber-tahun-tahun untuk seseorang yang tidak layak. Kalau sekarangpun ia sudah tak layak, 10 tahun dari sekarangpun ia juga tak akan layak. Biarkan dia pergi, lupakan...

Kepada sahabat - sahabatku semuanya

- *Jangan tertarik kepada seseorang karena parasnya, sebab keelokan paras dapat menyesatkan. Jangan pula tertarik kepada kekayaannya, karena kekayaan dapat musnah. Tertariklah kepada seseorang yang dapat membuatmu tersenyum, karena hanya senyum yang dapat membuat hari-hari yang gelap menjadi cerah. Semoga kamu menemukan orang seperti itu.*
- *Ada saat-saat dalam hidup ketika kamu sangat merindukan seseorang, sehingga ingin hati menjemputnya dari alam mimpi dan memeluknya dalam alam nyata. Semoga kamu memimpikan orang seperti itu.*
- *Bermimpilah tentang apa yang ingin kamu impikan, pergilah ke tempat-tempat kamu ingin pergi, jadilah seperti yang kamu inginkan, karena kamu hanya memiliki satu kehidupan dan satu kesempatan untuk melakukan hal-hal yang ingin kamu lakukan.*
- *Semoga kamu mendapatkan kebahagiaan yang cukup untuk membuatmu baik hati, cobaan yang cukup untuk membuatmu kuat, kesedihan yang cukup untuk membuatmu manusiawi, pengharapan yang cukup untuk membuatmu bahagia dan uang yang cukup untuk membeli hadiah-hadiah..*
- *Ketika satu pintu kebahagiaan tertutup, pintu yang lain dibukakan. Tetapi acapkali kita terpaksa terlalu lama pada pintu yang tertutup sehingga tidak melihat pintu lain yang dibukakan bagi kita.*
- *Sahabat terbaik adalah dia yang dapat duduk berayun-ayun di beranda bersamamu, tanpa mengucapkan sepatah katapun, dan kemudian kamu meninggalkannya dengan perasaan telah bercakap-cakap lama dengannya.*
- *Sungguh benar bahwa kita tidak tahu apa yang kita milik sampai kita kehilangannya, tetapi sungguh benar pula bahwa kita tidak tahu apa yang belum pernah kita miliki sampai kita mendapatkannya.*
- *Pandanglah segala sesuatu dari kacamata orang lain. Apabila hal itu menyakitkan hatimu, sangat mungkin hal itu menyakitkan hati orang itu pula.*
- *Kata-kata yang diucapkan sembarangan dapat menyulut perselisihan. Kata-kata yang kejam dapat menghancurkan suatu kehidupan. Kata-kata yang diucapkan pada tempatnya dapat meredakan ketegangan. Kata-kata yang penuh cinta dapat menyembuhkan dan memberkahi.*
- *Awal dari cinta adalah membiarkan orang yang kita cinta menjadi dirinya sendiri, dan tidak merubahnya menjadi gambaran yang kita inginkan. Jika tidak, kita hanya mencintai pantulan diri sendiri yang kita temukan di dalam dia.*
- *Orang-orang yang paling berbahagia tidak selalu memiliki hal-hal terbaik, mereka hanya berusaha menjadikan yang terbaik dari setiap hal yang hadir dalam hidupnya.*
- *Mungkin Tuhan menginginkan kita bertemu dengan beberapa orang yang salah sebelum bertemu dengan orang yang tepat, kita harus mengerti bagaimana berterima kasih atas karunia itu.*



***Emas diuji dengan api, wanita diuji dengan emas dan lelaki diuji dengan wanita.
Akal mengatakan perempuan itu cantik atas dasar ilmu dan kepintarannya.
Hati mengatakan perempuan itu cantik atas dasar akhlaqnya.
Dan nafsu mengatakan perempuan itu cantik atas dasar rupanya.
Masa depan adalah dibeli dengan masa sekarang***

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul “**Pengaruh Variasi Sudut Inklinali *Tangential Air Jet Inlets* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi *Annulus Jet***” dapat terselesaikan.

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

1. Bapak Ir. Bambang Indrayadi, MT, selaku Ketua Jurusan Mesin.
2. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M. Eng, selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT, selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan serta meluangkan waktu untuk berdiskusi bersama penyusun dalam menyusun skripsi ini.
5. Ibu Widya Wijayanti, S.T., MT, selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penyusun dalam menyusun skripsi ini.
6. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin.
7. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Semua pihak yang telah memberikan dorongan, semangat serta doa dalam penyelesaian skripsi ini.

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

Malang, Januari 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	ix
RINGKASAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pembakaran	5
2.2. Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran	5
2.3. Proses Pembakaran Gas	9
2.4. Pembakaran Difusi	10
2.5. Aliran Turbulen	13
2.6. Penyalaan dan Batas Ketidakhayalaan (<i>Limit of Inflammability</i>)	14
2.7. Kestabilan Api	15
2.8. Stabilitas Nyala dengan <i>Tangential Air Jet Inlets</i>	17
2.9. Distribusi Kecepatan dalam Aliran Berputar	20
2.10. LPG (<i>Liquified Petroleum Gas</i>)	21
2.11. Hipotesis	23
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1. Metode Penelitian	24
3.2. Variabel yang Diukur	24
3.3. Alat-alat yang Digunakan	25
3.4. Instalasi Penelitian	28

3.5. Metode Pengambilan Data	28
3.6. Rancangan Pengolahan Data	30
3.7. Diagram Alir Penelitian	31

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN 32

4.1. Hasil Penelitian	32
4.1.1. Kestabilan Nyala Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	32
4.1.1.1. Data Penelitian	32
4.1.1.2. Perhitungan Data	32
4.1.1.3. Visualisasi Api	35
4.1.2. Distribusi Temperatur Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	35
4.1.2.1. Data Penelitian	35
4.1.2.2. Kalibrasi Temperatur	35
4.2. Pembahasan	36
4.2.1. Grafik Kestabilan Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	36
4.2.2. Visualisasi Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	41
4.2.3. Distribusi Temperatur Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	45
4.2.3.1. Distribusi Temperatur berdasar Sudut Inklinasi	45
4.2.3.2. Distribusi Temperatur berdasar Jarak Aksial	49
4.2.4. Fluktuasi Temperatur Api Difusi <i>Annulus Jet</i>	52

BAB V PENUTUP 54

5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi udara kering	5
Tabel 2.2	Spesifikasi untuk <i>commercial propane</i> dan <i>n-butane</i>	22



DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Reaksi yang terjadi pada api	7
Gambar 2.2.	Difusi komponen A ke dalam komponen B	10
Gambar 2.3.	Perubahan aliran dan struktur api	11
Gambar 2.4.	Skema <i>lift off</i> pada api difusi <i>jet</i>	12
Gambar 2.5.	Gelombang pembakaran laminar dan turbulen	13
Gambar 2.6.	Fluktuasi kecepatan rata-rata	13
Gambar 2.7.	Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner satu dimensi	15
Gambar 2.8.	Jens profil api	16
Gambar 2.9.	Bentuk api difusi	17
Gambar 2.10.	Diagram <i>burner</i> dengan udara berputar menggunakan <i>tangential air</i>	17
Gambar 2.11.	Zona resirkulasi akibat aliran <i>swirl</i>	18
Gambar 2.12.	Efek <i>scale of turbulence</i> pada permukaan nyala	19
Gambar 2.13.	Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen	19
Gambar 3.1.	Variasi sudut <i>tangential air jet inlets</i>	26
Gambar 3.2.	Skema <i>annulus</i>	27
Gambar 3.3.	Skema instalasi penelitian	28
Gambar 3.4.	Distribusi temperatur api difusi <i>annulus jet</i>	30
Gambar 3.5.	Diagram alir penelitian	31
Gambar 4.1.	Hubungan antara tegangan (mV) dengan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	35
Gambar 4.2.	Grafik kestabilan api difusi <i>annulus jet</i> pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> .	38
Gambar 4.3.	Grafik kestabilan api difusi <i>annulus jet</i> pada berbagai kondisi	39
Gambar 4.4.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	41
Gambar 4.5.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	42
Gambar 4.6.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	42
Gambar 4.7.	Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	43
Gambar 4.8.	Visualisasi api <i>lift off</i> pada berbagai variasi sudut <i>tangential air jet inlets</i> .	43

Gambar 4.9.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	46
Gambar 4.10.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> . $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	48
Gambar 4.11.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	50
Gambar 4.12.	Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	51



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Perhitungan HHV dan LHV LPG	57
Lampiran 2	Data hasil penelitian dengan <i>tangential air jet inlets</i> 0°	59
Lampiran 3	Data hasil penelitian dengan <i>tangential air jet inlets</i> 20°	60
Lampiran 4	Data hasil penelitian dengan <i>tangential air jet inlets</i> 40°	61
Lampiran 5	Data hasil penelitian dengan <i>tangential air jet inlets</i> 60°	62
Lampiran 6	Data kecepatan dan massa alir dengan <i>tangential air jet inlets</i> 0°	63
Lampiran 7	Data kecepatan dan massa alir dengan <i>tangential air jet inlets</i> 20°	66
Lampiran 8	Data kecepatan dan massa alir dengan <i>tangential air jet inlets</i> 40°	69
Lampiran 9	Data kecepatan dan massa alir dengan <i>tangential air jet inlets</i> 60°	72
Lampiran 10	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 0° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	75
Lampiran 11	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 0° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	76
Lampiran 12	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 0° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	77
Lampiran 13	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 0° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	78
Lampiran 14	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 20° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	79
Lampiran 15	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 20° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	80
Lampiran 16	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 20° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	81
Lampiran 17	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 20° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	82
Lampiran 18	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 40° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	83

Lampiran 19	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 40° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	84
Lampiran 20	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 40° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	85
Lampiran 21	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 40° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	86
Lampiran 22	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 60° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	87
Lampiran 23	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 60° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$	88
Lampiran 24	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 60° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	89
Lampiran 25	Fluktuasi temperatur api difusi <i>annulus jet</i> dengan pemasangan <i>tangential air jet inlets</i> 60° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$	90



DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
Faktor kelebihan udara	–	λ
<i>Equivalece ratio</i>	–	Φ
Fluks massa per satuan waktu	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	\dot{m}_A
Koefisien difusi	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	D
Konsentrasi komponen A persatuan volume	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	C_A
Laju reaksi kimia	$\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	k_f
Energi aktivasi	$\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}$	E_a
Konstanta gas universal	$\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	R_u
Temperatur	K	T
Konstanta	–	A
Bilangan Reynold	–	Re
Laju aliran berputar	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	G_ϕ
Laju aliran aksial	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	G_x
Densitas udara	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	ρ
Jari-jari titik <i>r</i> dari sumbu <i>burner</i>	m	<i>r</i>
Jari-jari silinder <i>burner</i>	m	r_0
Kecepatan aksial di titik <i>r</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	U
Kecepatan tangensial di titik <i>r</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	W
<i>Swirl number</i>	–	S
Sudut inklinasi <i>tangential air jet inlets</i>	$^\circ$	θ
Kecepatan aliran bahan bakar	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	V
Kecepatan aliran udara tangensial	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	W
Kecepatan aliran udara aksial	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	U
Luasan <i>annulus</i>	m^2	$A_{annulus}$
Jari-jari lingkaran luar	m	R
Jari-jari lingkaran dalam	m	r
<i>Phi</i>	–	π
Nilai rata-rata keseluruhan data	–	\bar{X}
Jumlah data	–	N
Data ke <i>i</i>	–	X_i



Massa jenis bahan bakar	kg.m^{-3}	ρ_{bb}
Massa jenis udara	kg.m^{-3}	ρ_{ud}
Massa jenis minyak tanah	kg.m^{-3}	ρ_{m}
Massa jenis raksa	kg.m^{-3}	ρ_{Hg}
Beda ketinggian pada manometer	mm	Δh
Percepatan grafitasi bumi	m.s^{-2}	g
Rasio diameter orifis dan diameter saluran	—	β
Diameter pipa bahan bakar	m	D_{bb}
Diameter pipa udara	m	D_{ud}
Diameter nosel bahan bakar	m	D_{nos}
Diameter orifis saluran udara tangensial	m	$D_{\text{orifis jet}}$
Diameter saluran jet tangensial	m	D_{jet}
Diameter dalam orifis bahan bakar	m	d_{bb}
Diameter dalam orifis udara	m	d_{ud}
Diameter dalam orifis saluran jet tangensial	m	d_{jet}
Luas nosel bahan bakar	m^2	A_{nos}
Luas pipa udara aksial	m^2	A_{ud}
Luas orifis aluran jet tangensial	m^2	$A_{\text{orifis jet}}$
Luas saluran jet tangensial	m^2	A_{jet}
Faktor koreksi	—	C
<i>Damkohler number</i>	—	Da
<i>High Heating Value</i>	kcal.m^{-3}	HHV
<i>Lower Heating Value</i>	kcal.m^{-3}	LHV
Volume gas spesifik	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$	v
Konstanta Boltzman	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	k



RINGKASAN

Malik Hizbullah, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2007, **Pengaruh Variasi Sudut Inklinasi *Tangential Air Jet Inlets* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi *Annulus Jet***. Dosen Pembimbing: Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. dan Widya Wijayanti, ST., M.T.

Pembakaran difusi secara luas digunakan pada sistem pembakaran di industri. Salah satu metode yang digunakan adalah menghasilkan aliran udara berputar (*swirl*) dengan mengalirkan udara arah tangensial menggunakan *tangential air jet inlets*. Aliran udara berputar 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 sudut inklinasi *tangential air jet inlets* 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 sudut inklinasi *tangential air jet inlets*, yaitu 0° , 20° , 40° dan 60° , kecepatan aliran udara aksial konstan pada $1,158 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, 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 hanya dilakukan pada kecepatan aliran bahan bakar konstan yaitu $4,672 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* 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 *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60° . Dari data temperatur juga didapatkan hasil bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada tengah api

Keywords : pembakaran, *tangential air jet inlets*, *swirl*, kestabilan api.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini terus berkembang menuju kemajuan untuk menghasilkan sesuatu yang paling inovatif. Salah satunya adalah pengetahuan dan teknologi di bidang pembakaran. Karena pembakaran memegang peran penting hampir di semua aspek kehidupan, mulai dari kehidupan rumah tangga hingga dalam bidang industri dan transportasi, dimana sektor tersebut merupakan konsumen terbesar pemakai bahan bakar. Walaupun akhir-akhir ini banyak dikembangkan program diversifikasi energi, yaitu pencarian terhadap sumber-sumber energi baru yang dapat diperbaharui seperti energi surya, biogas, biomassa, *fuel cell* dan lain sebagainya. Pada kenyataannya sampai dengan saat ini pemanfaatan energi dari suatu proses pembakaran masih sangat dominan, karena dengan proses pembakaran dapat menghasilkan densitas daya yang tinggi sehingga daya yang besar dapat diperoleh dengan alat yang relatif kecil dan alasan lain adalah energi pembakaran dapat diperoleh dengan cepat dan mudah dalam pengontrolan. Kemajuan dalam pembangkitan energi tidak mungkin terjadi tanpa keunggulan dalam suatu proses pembakaran.

Pembakaran adalah reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dan udara (oksigen) dengan bantuan energi dari luar (energi aktivasi) disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Proses ini berfungsi untuk mengkonversikan energi kimia menjadi energi kalor yang dapat langsung digunakan atau dikonversikan lagi menjadi energi lain, sedangkan bahan bakar didefinisikan sebagai material yang mampu terbakar.

Salah satu jenis pembakaran adalah pembakaran difusi, yaitu apabila bahan bakar dan udara tidak bercampur lebih dulu secara mekanik melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Pembakaran difusi dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api korek api dan api kebakaran. Proses pembakaran difusi secara luas digunakan pada sistem pembakaran industri, seperti turbin gas, *boiler*, *furnace* dan *kiln* karena kemudahannya dalam mengontrol api hasil pembakaran dan alasan keamanan.

Mengingat betapa pentingnya pembakaran dalam bidang rekayasa, maka telah dilakukan berbagai penelitian tentang teknologi pembakaran yang bertujuan untuk memperbaiki unjuk kerja dari proses pembakaran, baik itu dari segi efisiensi maupun hasil

prosesnya. Hal ini dilakukan sebagai usaha untuk menemukan sesuatu yang baru (*discovery*) ataupun penerapan penemuan-penemuan baru tersebut bagi kehidupan manusia (*invention*). Mulai dari rekayasa proses, ruang bakar, maupun bahan bakar, dimana semuanya itu bertujuan sama yaitu menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dengan karakteristik api yang maksimal dan gas sisa yang minimal, dan yang lebih penting adalah penghematan bahan bakar minyak bumi serta pemakaian sumber energi alternatif. Dari segi aerodinamika pembakaran, proses pembakaran akan ditinjau dari aspek aliran, gerakan api, kestabilan nyala, dan *transport* fenomena yang terjadi dalam proses pembakaran.

Aliran *swirl* diusahakan terjadi pada setiap proses pembakaran difusi karena alasan kestabilan, dimana aliran *swirl* akan meningkatkan pencampuran antara udara dan bahan bakar sehingga kestabilan api akan meningkat dan berpengaruh besar terhadap karakteristik api dan emisi polutan. Lilley (1997) menyatakan bahwa pengaruh angka *swirl* telah banyak diteliti dan hampir semuanya menyimpulkan bahwa aliran *swirl* akan menciptakan daerah resirkulasi sehingga akan menyebabkan pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi lebih baik.

Masri, A. R., et al., (2000), telah melakukan penelitian *strongly swirling nonpremixed flame stabilized on new burner* dengan menggunakan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 15° dan berjarak 150 mm dari *burner exit plane* yang menggunakan *annulus* berdiameter 60 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah *Compressed Natural Gas* (CNG). Hasilnya menunjukkan bahwa aliran *swirl* yang dihasilkan akan menghasilkan gradien tekanan yang melawan arah aliran dan menyebabkan lapisan geser pada arah aksial dan tangensial, hal ini akan mengakibatkan adanya zona resirkulasi yang membawa kembali produk panas hasil pembakaran untuk kembali pada *burner exit plane* yang mengakibatkan nyala api menjadi lebih stabil.

Solero, Giulio., et al., (2000), telah melakukan penelitian *turbulent mixing in swirl burner* yang juga menggunakan *tangential air jet inlets* pada sebuah *annulus* dalam usaha menghasilkan aliran *swirl*. Bahan bakar yang digunakan adalah *methane*. Hasilnya menunjukkan pengaruh kecepatan tangensial terhadap gradien *central vortex region* dan *vortex distortion* yang menciptakan suatu kecepatan radial yang rata pada *jet exit plane*, yang berakibat meluaskan dan menggeser zona api ke arah luar dan adanya zona resirkulasi lebih baik yang meningkatkan pencampuran dan reaksi kimia antara bahan bakar dan udara, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, maka dilakukan suatu penelitian mengenai pengaruh variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* pada *annulus* udara

sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi *jet*. Pemakaian *tangential air jet inlets* ini dimaksudkan untuk menimbulkan efek resirkulasi pada aliran udara berputar yang dihasilkan dari kompresor, sehingga campuran bahan bakar dan udara semakin homogen dan mengakibatkan proses pembakaran menjadi lebih baik. Selain itu, dengan penambahan massa alir udara dan massa alir bahan bakar dapat diteliti lebih lanjut mengenai kestabilan nyala dan distribusi temperatur serta dapat juga diketahui gambaran fenomena yang terjadi pada api difusi *jet* dengan menggunakan *tangential air jet inlets*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimana pengaruh variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* pada api difusi *annulus jet* sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur?

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. Udara lingkungan sekitar diasumsikan memiliki kelembaban dan temperatur konstan.
3. Konstruksi dari instalasi penelitian tidak diperhitungkan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* pada *annulus* udara yang paling optimal sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi *jet*.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun 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 lebih sempurna.
4. Dapat meningkatkan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi terutama tentang teknologi pembakaran dengan pemasangan *tangential air jet inlets* pada pembakaran difusi.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembakaran

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

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



Pemasangan *tangential air jet inlets* pada aliran udara akan menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada reaktan yang berpengaruh juga terhadap produk pembakaran. Produk pembakaran yang diamati dalam penelitian ini adalah kestabilan nyala dan temperatur api difusi *annulus jet*.

2.2. Reaksi Kimia pada Proses Pembakaran

Pembakaran ideal adalah pembakaran yang dapat menghasilkan produk pembakaran secara sempurna. Kondisi ini disebut dengan kondisi stoikiometri dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon adalah CO₂, H₂O, dan N₂ sebagai *inert* gas. Pembahasan akan dibatasi pada proses pembakaran antara bahan bakar hidrokarbon dan oksigen dari udara. Udara memiliki komposisi sebagai berikut:

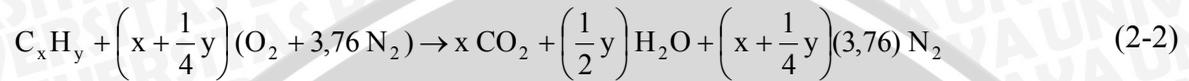
Tabel 2.1 Komposisi udara kering

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

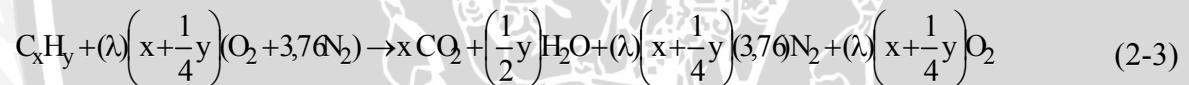
Sumber : Tjokroawidjojo, 1986 : 47

Untuk perhitungan dalam reaksi pembakaran, udara dianggap terdiri dari 21% volume O₂ dan 79% volume N₂, sehingga untuk penggunaan 1 mol O₂ akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N₂

Untuk memenuhi pembakaran sempurna, semua C bereaksi menjadi CO₂ dan semua H₂ akan bereaksi menjadi H₂O. Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar (C_xH_y) dengan udara secara matematis dituliskan sebagai berikut (Wardana, 1995: 21):



Dalam persamaan tersebut digunakan jumlah udara minimum yang biasa disebut dengan “udara teoritis”. Akan tetapi, dalam kondisi aktual pembakaran sempurna hampir tidak pernah terjadi karena pembakaran berlangsung secara kompleks. Pembakaran tidak hanya tergantung pada model ruang bakarnya tetapi juga tergantung kondisi dari bahan bakar, udara dan temperatur pembakarannya. Salah satu cara untuk memperbesar kemungkinan terjadinya pembakaran sempurna adalah dengan menggunakan jumlah udara berlebih (*excess air*). Apabila digunakan udara pembakaran sebanyak λ x jumlah udara teoritis, persamaan reaksinya akan menjadi:



dengan:

- λ = faktor kelebihan udara
- λ = 1, apabila dipergunakan udara teoritis
- λ > 1, apabila dipergunakan udara berlebih
- λ < 1, apabila kekurangan udara

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

$$(AFR)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}}\right)_{\text{teoritis}} \left(\frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}\right) \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-4)$$

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

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

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{teoritis}}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{aktual}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2-5)$$

dengan:

- $\Phi > 1$, apabila campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixtures*)
- $\Phi < 1$, apabila campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixtures*)
- $\Phi = 1$, apabila campuran stoikiometri

Pada semua proses pembakaran, diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna.

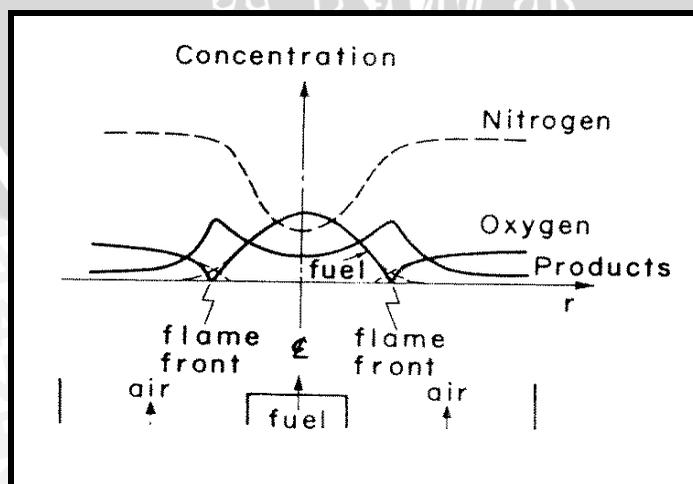
Untuk memperoleh hal ini, ada empat syarat yang harus dipenuhi, yaitu :

1. Bahan bakar menguap secara efisien
2. Digunakan cukup udara pembakaran
3. Terjadi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara
4. Suhu pembakaran cukup tinggi

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



Pada reaksi pembakaran di atas terlihat bahwa hasil pembakarannya tidak sempurna, dikarenakan pada reaksi pembakaran (2-6) menghasilkan CO dan pada reaksi pembakaran (2-7) masih tertinggal H_2 . Pada proses pembakaran yang sempurna seluruh bahan bakar akan teroksidasi, seperti halnya reaksi pembakaran di bawah ini :



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

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

Campuran yang terlalu kaya bahan bakar atau miskin udara akan membuat pembakaran menjadi tidak sempurna dan akan menghasilkan sejumlah gas yang tidak diinginkan seperti CO pada gas buangnya dan menyebabkan kerugian panas yang cukup tinggi. Sehingga kebanyakan dari suatu proses pembakaran harus ditambahkan sejumlah udara pembakaran lagi agar semua bahan bakar dapat bereaksi secara sempurna dengan udara.

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

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

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

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

Radikal bebas diperlukan untuk menjaga agar proses pembakaran dapat terus berjalan. Proses pembakaran pada dasarnya merupakan reaksi kimia dan penyebab terjadinya reaksi kimia adalah keinginan suatu atom untuk mencapai posisi yang stabil. Oleh karena itu, reaksi kimia diawali dari ketidakstabilan dari suatu atom. *Tangential air jet inlets* akan mengakibatkan bertambahnya radikal bebas yang merupakan atom tidak stabil, sehingga radikal bebas tersebut akan bertindak sebagai agen yang menyebabkan molekul lain yang masih stabil menjadi tidak stabil. Radikal bebas ini bekerja terus menerus, sehingga seluruh bahan bakar akan habis terbakar. Semakin banyak radikal bebas, maka reaksi kimia antara bahan bakar dan udara juga akan semakin cepat, sehingga pembakaran akan semakin mendekati sempurna.

2.3. Proses Pembakaran Gas

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

a. *Homogeneous combustion*

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

b. *Isopiestic flame propagation*

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

c. *Pressure temperature flame propagation*

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

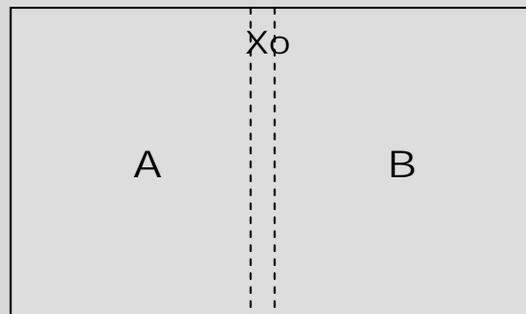
Pembakaran yang dapat diamati dengan adanya nyala merupakan pembakaran *isopiestic flame propagation* dan *pressure temperature flame propagation*. Pada kenyataannya, kedua jenis pembakaran yang menimbulkan nyala tersebut adalah pembakaran yang digunakan di dunia industri, sebab kedua jenis pembakaran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

Proses pembakaran dengan menggunakan bahan bakar gas sering menggunakan peralatan yang disebut *gas burner*. Pada sistem pembakaran ini sering menggunakan

peralatan tambahan yang disebut dengan *oxygen addition equipment*. Tujuan digunakannya peralatan ini adalah untuk memperbaiki kinerja proses pembakaran. Dengan meningkatnya kinerja dari proses pembakaran maka akan diperoleh penurunan nilai *specific fuel consumption*, sehingga jika ditinjau dari segi ekonomis berarti kita mampu menekan biaya pembelian bahan bakar.

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

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

$$\frac{m_A}{A} = -D \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (\text{Holman, 1991: 533}) \quad (2-10)$$

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

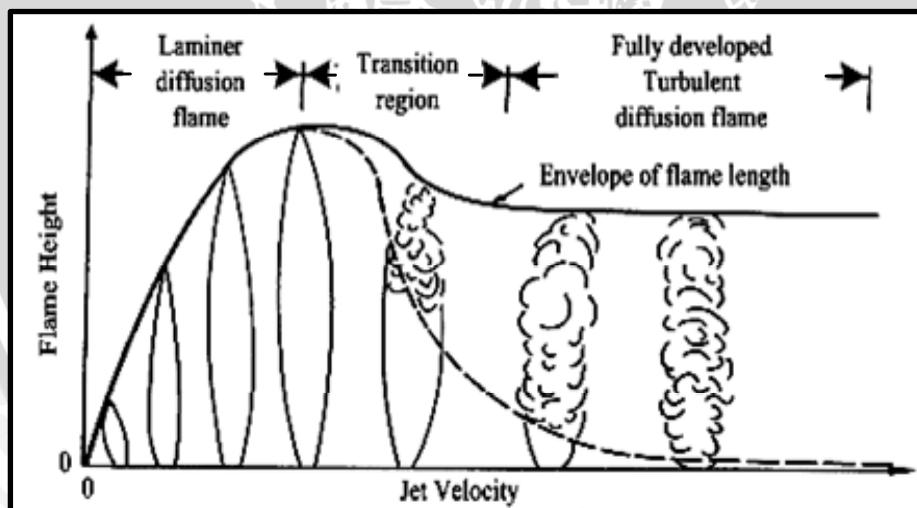
D = koefisien difusi (diffusion coefficient) ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

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

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

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

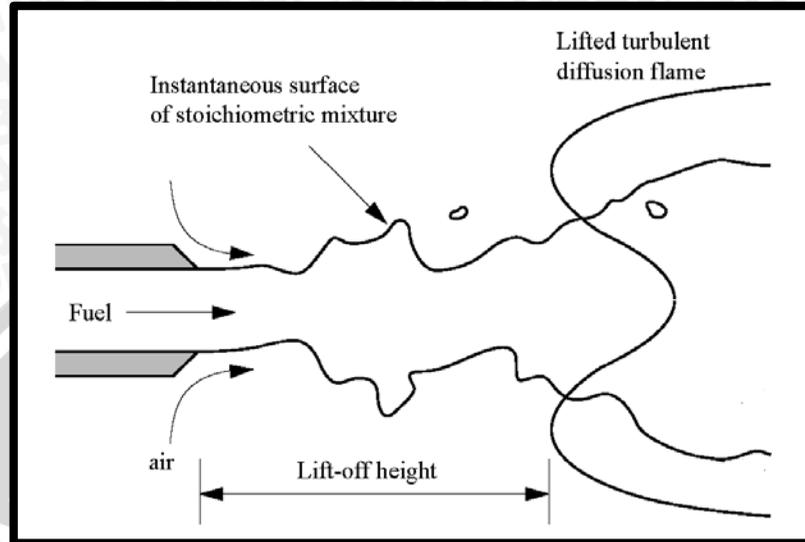
Gambar 2.3 menjelaskan tentang perubahan aliran api difusi *jet* laminer ke api difusi *jet* turbulen. Perubahan aliran api tersebut disebabkan oleh pemanjangan api dan peningkatan kecepatan aliran (*jet*) bahan bakar. Peningkatan kecepatan bahan bakar mengakibatkan karakter api berubah. Pada kecepatan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



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

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

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

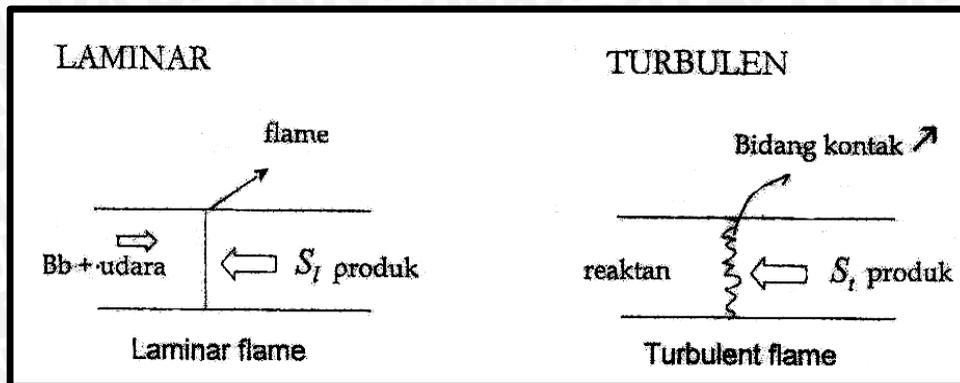


Gambar 2.4 : Skema *lift off* pada api difusi *jet*
Sumber : Peters, 1997: 95

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* dapat terjadi bila api difusi telah melewati batas kritis *lift off*. Baik *lift off* maupun *blow off* merupakan kondisi yang harus dihindari dalam proses pembakaran. Takahashi dalam “*Lifting Criteria of Jet Diffusion Flame*” (1990) menyatakan bahwa kondisi *lift* dipengaruhi oleh pangkal api akibat ketidakseimbangan antara kecepatan penyalaan maksimum. Selain pengaruh kecepatan pancar bahan bakar yang membuat angka Reynold aliran bertambah besar, sebenarnya suatu fenomena *lift* dipengaruhi oleh banyak faktor. Lee (1994), menyatakan bahwa semakin besar diameter pipa bahan bakar maka kecenderungan untuk mengalami *lift off* semakin sulit. Takahashi (1990), juga menyatakan bahwa *lift* dipengaruhi oleh *lip thickness* pipa bahan bakar dan keturbulensian aliran dalam pipa.

Pemasangan *tangential air jet inlets* pada aliran udara akan menghasilkan suatu aliran yang bersirkulasi, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan gas reaktan. Hal ini akan merubah rambatan gelombang pembakaran stasioner dari laminar menjadi turbulen (Gambar 2.5), sehingga bidang kontak antar reaktan menjadi semakin luas, akibatnya batas *lift off* dan *blow off* akan mengalami peningkatan. Semakin besar aliran

yang bersirkulasi, maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya luasan daerah kestabilan api juga akan semakin bertambah atau bisa dikatakan kestabilan api mengalami peningkatan.

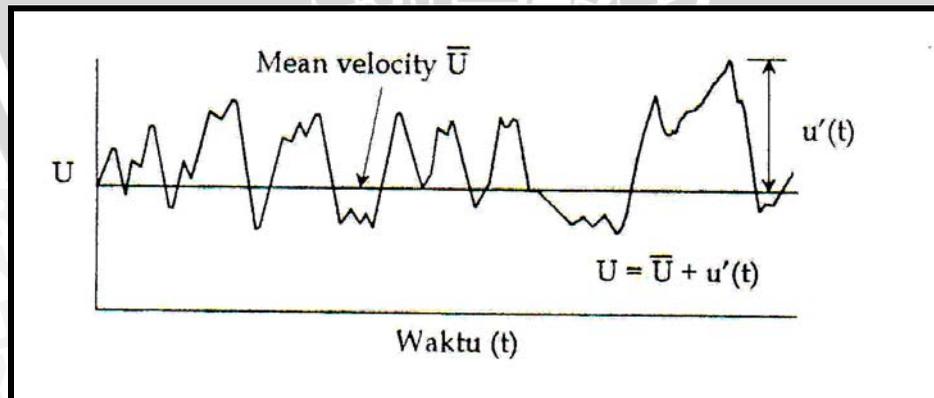


Gambar 2.5 : Gelombang pembakaran laminar dan turbulen
 Sumber : Widodo II, 2005: 1

2.5. Aliran Turbulen

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

Kecepatan makroskopik fluida pada sistem turbulen seperti yang diukur pada anemometer kawat panas dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 : Fluktuasi kecepatan rata-rata
 Sumber : Rathakrisnan, 1993: 56

Dari gambar 2.6 dapat dijelaskan bahwa pada aliran turbulen kecepatan partikel-partikel fluida sangat fluktuatif. Kecepatan yang fluktuatif tersebut disebabkan karena partikel-partikel fluida bergerak pada lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, akibatnya terjadi tumbukan dari masing-masing partikel fluida.



2.6. Penyalaan dan Batas Ketidaknyalaan (*Limit of Inflammability*)

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

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

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

1. Suhu (*temperature*)

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

2. Waktu (*time*)

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

3. Turbulensi (*turbulence*)

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

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

$$kf = A \exp \left[-\frac{Ea}{Ru \cdot T} \right] \quad (\text{Kuo, 1986: 737}) \quad (2-11)$$

dimana:

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

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

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

T = suhu mutlak (K)

A = konstanta

Seperti telah dijelaskan di depan bahwa dalam pembakaran diperlukan udara pembakaran. Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna diperlukan udara pembakaran yang berlebih. Perlu diingat pembakaran udara berlebih, banyak atau sedikit udara daripada 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 :

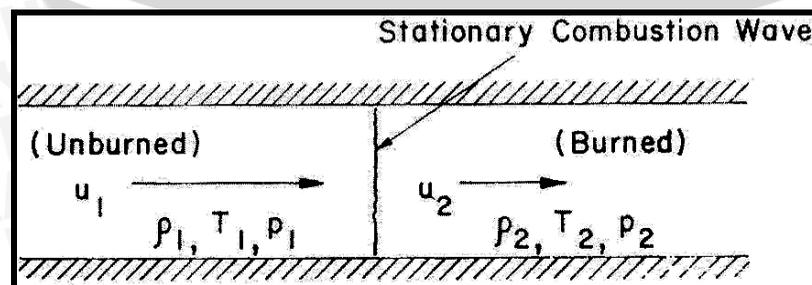
a. *Lower Inflammability Limit* (LIL)

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.

2.7. Kestabilan Api

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



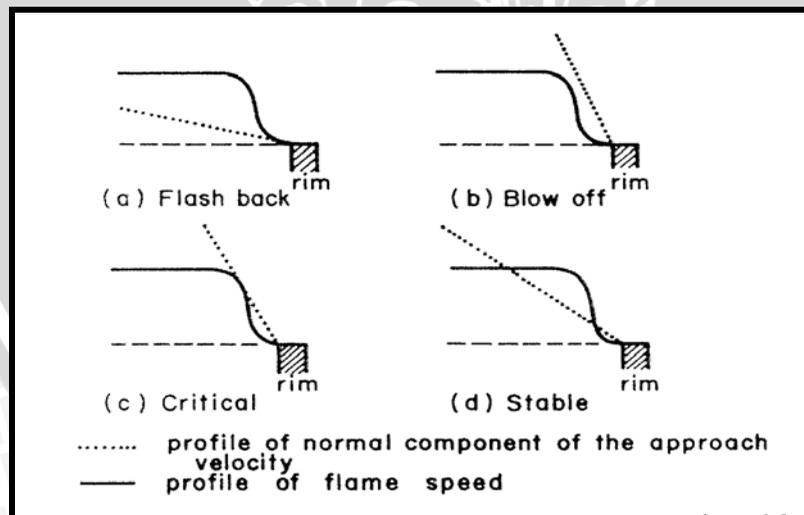
Gambar 2.7 : Skema diagram dari perambatan pembakaran stasioner satu dimensi

Sumber : Kuo, 1986 : 233

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

Kondisi pembakaran yang stabil akan terjadi jika garis kecepatan gas reaktan menyinggung garis kecepatan pembakaran di dua titik seperti ditunjukkan gambar 2.8 (d). Jika garis kecepatan reaktan tidak memotong garis kecepatan pembakaran, maka akan terjadi *blow off* yang ditunjukkan pada gambar 2.8 (b). Pada kondisi lain jika garis kecepatan gas reaktan memotong garis kecepatan pembakaran di dua titik, yaitu kondisi dimana kecepatan gas reaktan lebih rendah daripada kecepatan pembakaran, maka akan terjadi peristiwa *flash back* ditunjukkan pada gambar 2.8 (a). Peristiwa ini merupakan rambatan dengan kecepatan yang tinggi menuju mulut nosel.

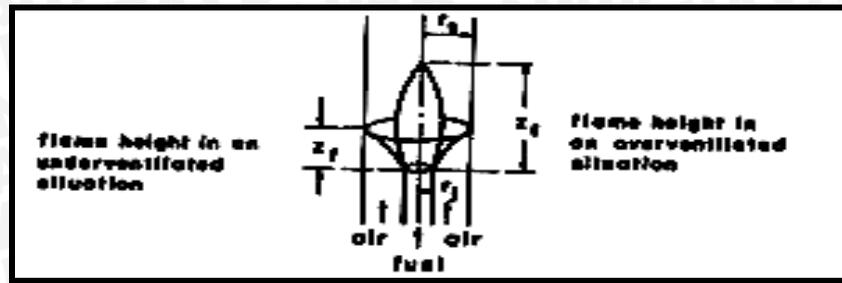
Pada saat terjadi *blow off* telah dijelaskan bahwa api akan menjauhi nosel terlebih dahulu kemudian mati. Pada saat itu aliran udara yang terbentuk disekitar api akan berbeda karena api terbentuk di atas nosel, panas yang semakin hilang dan laju reaksi yang semakin menurun.



Gambar 2.8 : Jenis profil api

Sumber : Kuo, 1986 : 324

Model umum yang digunakan untuk meneliti dan menganalisis nyala api difusi adalah dengan sistem pembakaran yang aliran bahan bakar dan udaranya sejajar dalam tabung pembakaran yang silindris dan koaksial. Model ini pertama kali diperkenalkan oleh Burke dan Schumann pada tahun 1979.



Gambar 2.9 : Bentuk api difusi
 Sumber : Kuo, 1986; 348

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

1. Nyala api menguncup ke sumbu tabung pembakaran

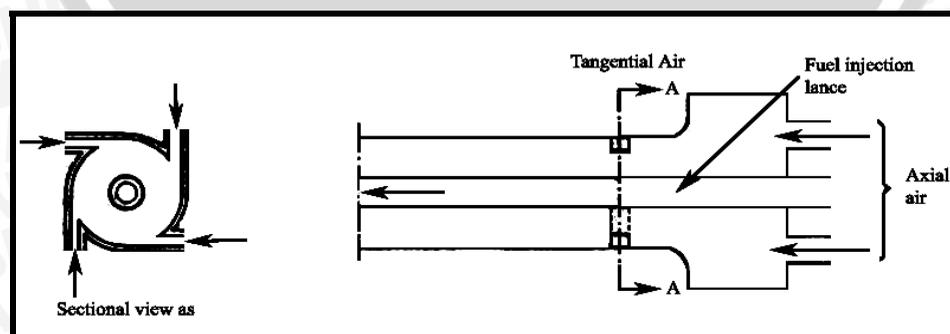
Kondisi ini terjadi jika perbandingan diameter tabung pembakaran terhadap diameter nozzle bahan bakar sedemikian rupa sehingga udara yang masuk ke tabung pembakaran lebih banyak daripada yang diperlukan untuk proses pembakaran sempurna (*overventilated*).

2. Nyala api melebar ke dinding tabung pembakaran

Kondisi ini terjadi jika perbandingan diameter tabung pembakaran terhadap diameter nozzle sedemikian rupa sehingga udara yang masuk ke tabung pembakaran lebih sedikit daripada yang diperlukan untuk proses pembakaran sempurna (*underventilated*).

2.8. Stabilitas Nyala dengan *Tangential Air Jet Inlets*

Prinsip kestabilan dengan fluida berputar di saluran keluar *burner* mirip dengan prinsip kestabilan dengan penghalang. Ide dasarnya adalah menciptakan daerah *downstream* bertekanan rendah sepanjang sumbu *burner*. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar disekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran udara aksial dan tangensial (Monnot, 1995: 91).

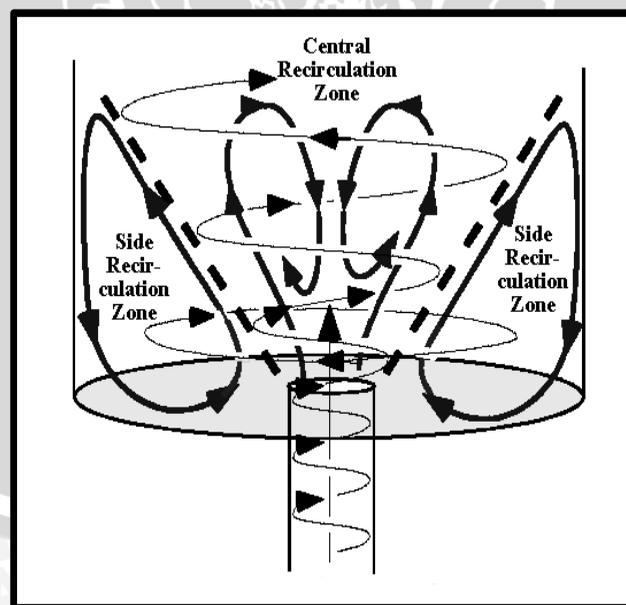


Gambar 2.10 : Diagram *burner* dengan udara berputar menggunakan *tangential air*
 Sumber : Monnot, 1985 : 92

Fluida mulai berputar biasanya melibatkan udara pembakaran, baik seluruhnya maupun sebagian. Kenyataannya jika bahan bakar yang digunakan adalah cair atau bahan bakar yang teratomisasi maka hanya udara yang memiliki energi kinetik saja yang biasanya diubah menjadi energi putar. Jika bahan bakar adalah berupa gas maka biasanya dilengkapi dengan pengatur tekanan pada instalasi pipanya, penambahan tersebut menghemat penggunaan energi yang digunakan untuk mengatur pola aliran fluida.

Perputaran udara dalam tabung *burner* dimulai adanya energi potensial dari tekanan *upstream*. Energi tekanan tersebut diubah menjadi energi kinetik yaitu berupa kecepatan baik dalam arah tangensial ataupun secara melingkar. Aliran berputar akan mengembang dan udara pembakaran akan terkumpul di batas lingkaran akibat gaya sentrifugal.

Pemasangan *tangential air jet inlets* yang ditunjukkan oleh gambar 2.10 pada saluran udara akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl*. Gambar 2.11. menunjukkan adanya zona resirkulasi yang ditimbulkan oleh aliran *swirl*, akibatnya ada 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.

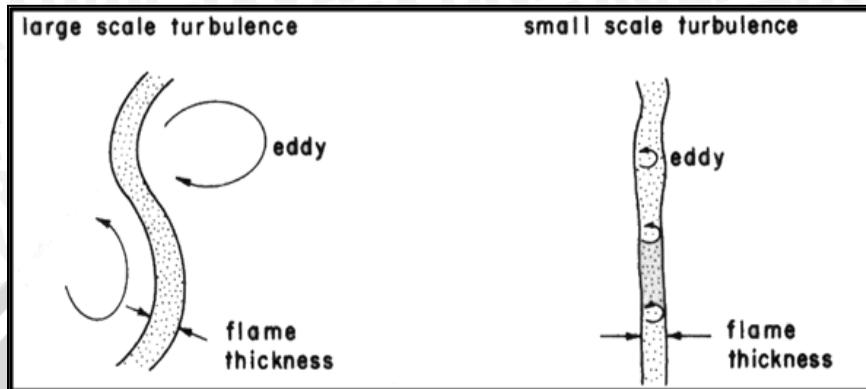


Gambar 2.11 : Zona resirkulasi akibat aliran *swirl*
Sumber : Hedman, 2002: 3

Dengan adanya pemanasan awal berarti terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, sehingga energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Akibatnya molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan,

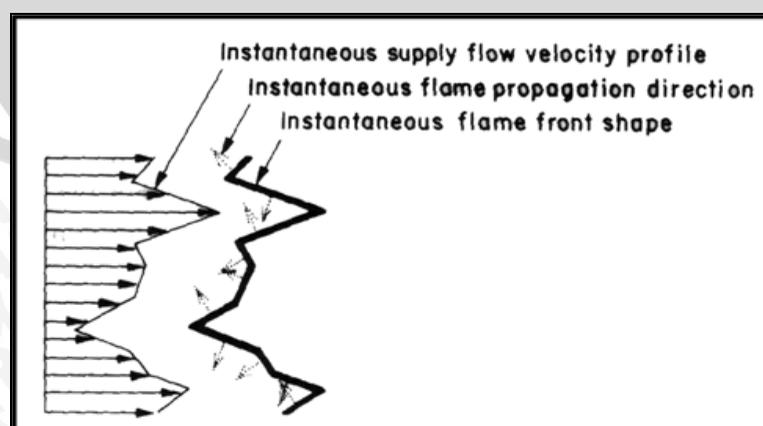
sehingga pembakaran akan semakin baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986) bahwa semakin tinggi temperatur awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

Kecepatan tangensial akan membagi aliran fluida menjadi skala (*scale*) yang lebih kecil, sehingga akan berpengaruh terhadap struktur permukaan nyala seperti ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut:



Gambar 2.12 : Efek *scale of turbulence* pada permukaan nyala
 Sumber : Kuo, 1986: 418

Pada $2300 \leq Re \leq 6000$, terjadi olakan-olakan kecil (*small eddies*), sehingga turbulensi terjadi pada skala yang baik (Kuo, 1986: 406). Pada *small eddies* ukuran pusaran (*eddy size*) lebih kecil dari ketebalan permukaan nyala (*flame front thickness*). Efek yang ditimbulkan adalah meningkatkan proses *transport* dalam gelombang pembakaran. Ketika $Re \geq 6000$, terjadi *large eddies* yang menyebabkan ketebalan permukaan nyala lebih besar dari pada saat kondisi laminar. *Large eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small eddies*, tetapi sebaliknya akan merubah permukaan nyala laminar yang *smooth* menjadi bentuk lipatan-lipatan pada permukaan nyala (Gambar 2.13). Hal ini akan meningkatkan daerah permukaan nyala untuk setiap unit penampang melintang pada *tube*, akibatnya terjadi peningkatan kecepatan pembakaran tanpa terjadi perubahan pada struktur api lokal.



Gambar 2.13 : Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen
 Sumber : Kuo, 1986: 407

Dengan variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* maka diharapkan akan didapatkan aliran udara yang berekspansi ke arah tangensial atau ke arah keluar sehingga meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial yang menurun pada zona resirkulasi yang memungkinkan kecepatan reaksi dan kecepatan aliran dapat seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi lebih besar. Akan tetapi hal ini bisa terjadi sebaliknya karena terlalu besar kecepatan tangensial yang ditimbulkan maka akan terjadi penurunan kecepatan aksial yang cukup besar sehingga membawa aliran udara tangensial menuju ke arah keluar dan memungkinkan penurunan kecepatan reaksi pembakaran serta menurunkan proses difusi yang terjadi antara bahan bakar dan udara. Ketika pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik maka *damkohler number* menjadi lebih besar, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi mencukupi (*characteristic chemical time*) dibandingkan waktu untuk mengalir (*characteristic flow time*).

2.9. Distribusi Kecepatan dalam Aliran Berputar (*Swirl*)

Aliran berputar didefinisikan sebagai perbandingan laju aliran berputar (G_ϕ) dengan laju aliran aksial (G_x). Bentuk ini dijabarkan sebagai berikut:

$$G_\phi = \int_0^{r_0} 2\pi\rho U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-12)$$

dengan :

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

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

ρ = densitas udara (kg.m^{-3})

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

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

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

Selama variasi tekanan dalam burner kecil, maka nilai ρ dapat diasumsikan konstan sehingga:

$$G_\phi = 2\pi\rho \int_0^{r_0} U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-13)$$

Penjelasan untuk aliran aksial dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$G_x = \int_0^{r_0} 2\pi \rho U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-14)$$

sehingga:

$$G_x = 2 \pi \rho \int_0^{r_0} U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-15)$$

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

$$S = \frac{G_\phi}{r G_x} \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2-16)$$

Intensitas pembakaran untuk aliran yang bersirkulasi dipengaruhi oleh derajat dari *swirl* yang dipasang 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 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 (CH_4), ethana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{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 (www.pertamina.com, September 2006):

1. *LPG Mix*

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

2. *LPG Propane*

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

3. *LPG Butane*

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

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

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

<i>Properties</i>	<i>Hydrocarbon</i>	<i>propane</i>	<i>n - butane</i>
	<i>High heating value</i>	(kcal.kg ⁻¹)	12.034
	(kcal.m ⁻³)	24.290	31.990
<i>Low heating value</i>	(kcal.kg ⁻¹)	11.079	10.926
	(kcal.m ⁻³)	22.370	29.540
kg air/kg fuel		15,63	15,42
(NTP) m ³ air/kg fuel		12,09	11,93
(NTP) m ³ air/ m ³ fuel		24,41	32,25
<i>Maximum CO₂ in wet flue gas (% volume)</i>		11,56	11,90
<i>Maximum CO₂ in dry flue gas (% volume)</i>		13,64	13,99
<i>Temperature (°C) of adiabatic combustion</i>			
<i>instoichiometric air at (°C) and 1 bar</i>		1.994	1.996
<i>Temperature of autoignition (°C) in</i>			
<i>stoichiometric air</i>		480	420

Sumber: Monnot, 1985: 8



2.11. Hipotesis

Dari uraian diatas dapat diambil suatu hipotesis bahwa semakin besar sudut inklinalasi *tangential air jet inlets* pada *annulus* udara akan menyebabkan resirkulasi pada aliran udara semakin meningkat, sehingga campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen, hal ini akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, akibatnya kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi *jet* akan meningkat.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

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

3.2. Variabel yang Diukur

Ada dua 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, sehingga akan didapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat agar tujuan penelitian dapat tercapai. Dalam penelitian ini variabel bebasnya adalah:

- Sudut inklinasi *tangential air jet inlets* (θ) : $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ dan 60°
- Kecepatan aliran bahan bakar (V) : $1 \div 20$ [m.s⁻¹]
- Kecepatan aliran udara tangensial (W) : $1 \div 20$ [m.s⁻¹]

Untuk mendapatkan data kestabilan nyala dan temperatur pada api difusi *annulus jet* dapat diperoleh dengan mengubah variabel bebas yang meliputi kecepatan aliran bahan bakar (V) dan kecepatan aliran udara tangensial (W) sesuai dengan beda ketinggian manometer yang ditentukan sebelumnya untuk setiap variasi pemasangan *tangential air jet inlets* yang berbeda.

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 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 :

- Jumlah *tangential air jet inlets* : 4
- Kecepatan aliran udara aksial (U) : 1,158 m.s⁻¹

- Diameter nosel bahan bakar : 2 mm
- Diameter *tangential air jet inlets* : 3 mm
- *Tangential air jet inlets* diletakkan pada *annulus* udara pada posisi 150 mm pada sumbu *y burner exit plane*.

3.3. Alat-alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Blower*

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

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

2. *Stop valve*

Digunakan untuk mengatur 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. Pipa udara

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

5. *Manometer*

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

6. Tabung gas

Tabung gas digunakan untuk menampung bahan bakar gas LPG.

7. Nosel

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

8. Kamera digital

Digunakan untuk mengambil gambar nyala api dengan *tangential air jet inlets*. Kamera digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

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

9. Kaca pengamatan

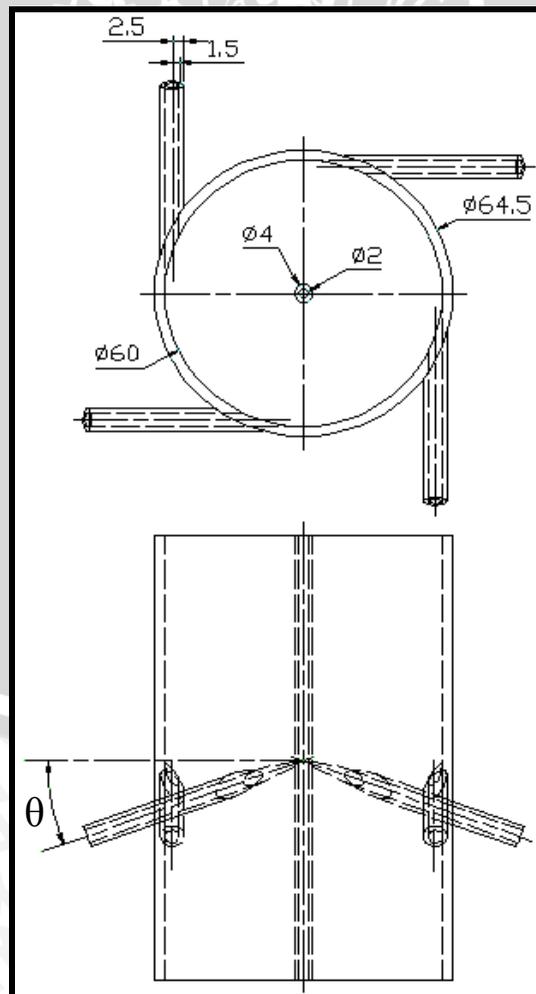
Digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap api difusi yang terjadi selama penelitian berlangsung. Kaca pengamatan tersebut berukuran 16 cm x 56 cm.

10. 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.

11. *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.

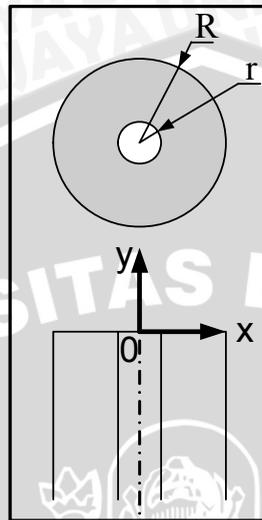


Gambar 3.1 Variasi sudut *tangential air jet inlets*

Dengan variasi sudut $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$, $\theta_4 = 60^\circ$

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

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



Gambar 3.2 : Skema *annulus*

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

Luas *annulus* dituliskan seperti berikut:

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

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

r = jari-jari lingkaran dalam (m)

12. Cerobong

Cerobong merupakan tempat keluarnya asap dari hasil proses pembakaran.

13. 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 .

14. Perangkat Sensor

Perangkat sensor terdiri dari :

a. Operational Amplifier

Digunakan untuk menguatkan sinyal yang dihasilkan oleh sensor.

b. ADC (Analog to Digital Converter)

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

15. Komputer

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

16. Kompresor

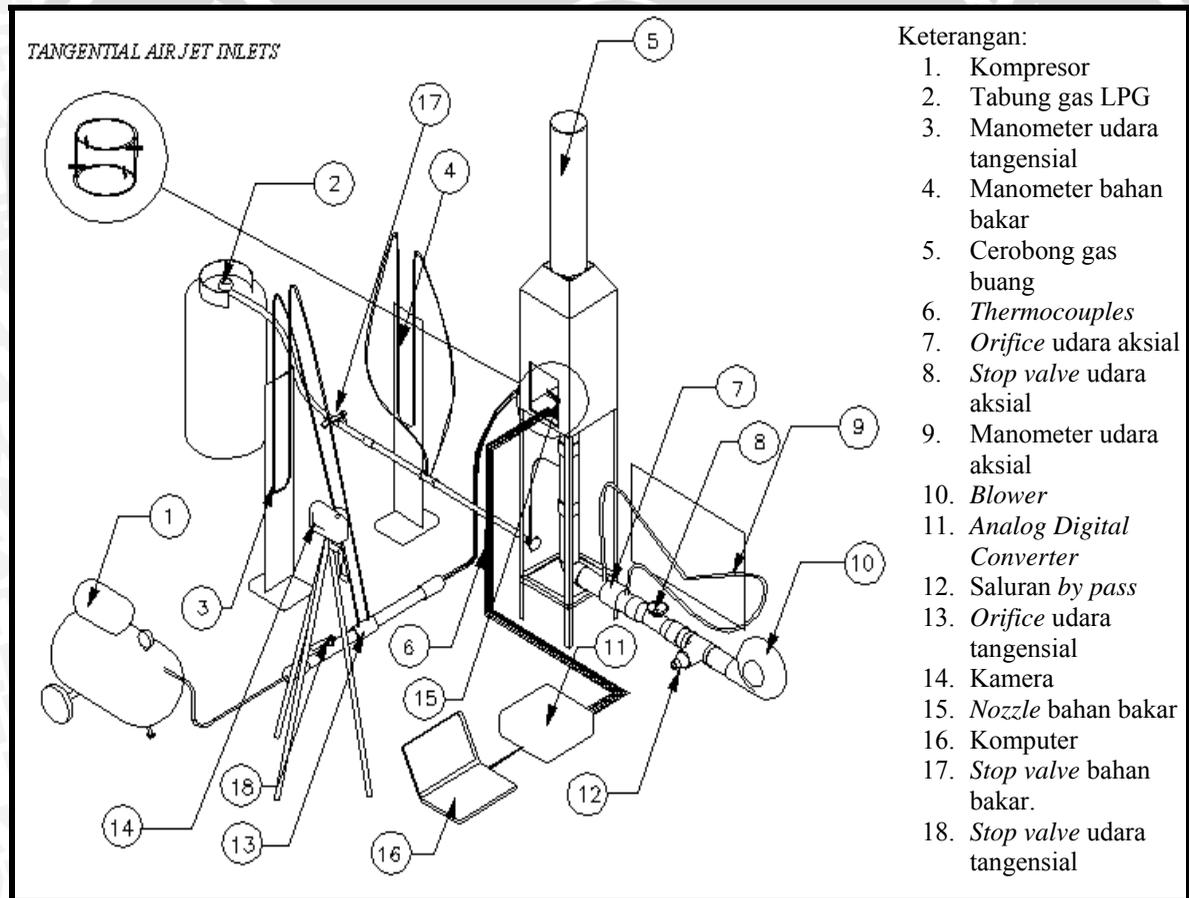
Kompresor digunakan untuk mensuplai udara pembakaran pada arah tangensial.

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

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



Gambar 3.3. Skema instalasi penelitian

3.5. Metode Pengambilan Data

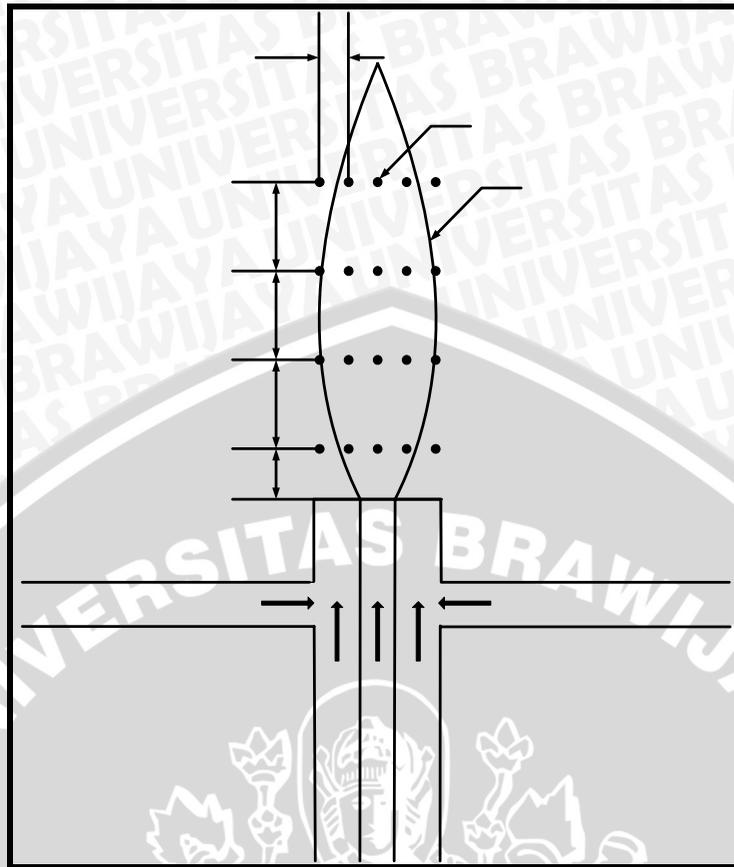
Untuk mendapatkan data penelitian yang diinginkan, maka langkah-langkah yang dilakukan adalah:

a) Untuk mengetahui kestabilan api difusi:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan dalam pengambilan data.
2. Mengatur aliran udara aksial yang dihasilkan *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan $1,158 \text{ m.s}^{-1}$.
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 sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang berbeda.

b) Untuk mengetahui distribusi temperatur:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengatur aliran udara aksial yang dihasilkan *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan $1,158 \text{ m.s}^{-1}$.
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* dalam arah horisontal tiap 10 mm dan vertikal tiap 30 mm dan 60 mm pada saat kondisi tersebut dengan menggunakan *thermocouples* dan perangkat komputer. Data yang diambil sebanyak 300 data setiap titik pengukuran.



Gambar 3.4 Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

7. Mematikan api dan melakukan langkah 2 sampai 6 dengan sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang berbeda.

3.6. Rancangan Pengolahan Data Perhitungan nilai rata-rata

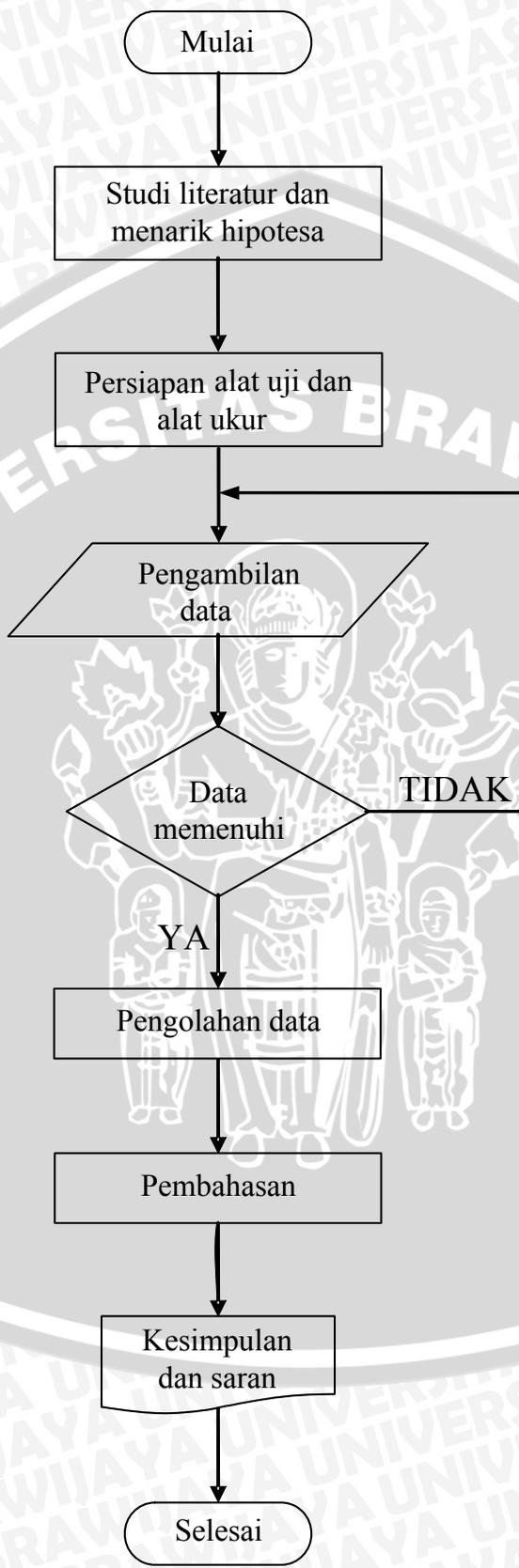
Setiap pengukuran diambil nilai rata-ratanya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (\text{Hifni, 1993: 42}) \quad (3 - 2)$$

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

Nilai rata-rata tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kecenderungan tingkat kestabilan, 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.

3.7. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian ini berupa kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer melalui *orifice* udara baik itu udara arah aksial maupun arah tangensial dan kecepatan aliran bahan bakar yang diukur dengan manometer melalui *orifice* bahan bakar. Dengan prinsip beda tekanan pada penampang saluran akibat melalui *orifice*, maka dapat kita tentukan kecepatan aliran dengan persamaan Bernoulli. Serta dapat diperoleh data temperatur yang diukur dengan *thermocouples*. Data kecepatan aliran udara dan bahan bakar diplot dalam diagram kestabilan api (pada sumbu x – y), sedangkan data tegangan (mV) yang dihasilkan *thermocouples* dikonversikan menjadi temperatur. Dari data temperatur akan diperoleh nilai temperatur rata-rata sehingga diketahui distribusi temperatur ke arah horisontal. Pada tiap titik pengamatan diperoleh data fluktuasi temperatur.

4.1.1. Kestabilan nyala api difusi *annulus jet*

4.1.1.1. Data penelitian

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali, sehingga bisa mewakili keragaman dari data yang diperoleh. Data (lampiran 2 sampai dengan lampiran 5) adalah data kestabilan nyala api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* yang sudut inklinasinya divariasikan.

4.1.1.2. Perhitungan data

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

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

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

ρ_{m} = massa jenis minyak tanah (835 kg.m^{-3})

ρ_{Hg} = massa jenis raksa (13.600 kg.m^{-3})

Δh = beda ketinggian pada manometer (mm)

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

β = rasio diameter orifis dan diameter saluran

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

D_{ud} = diameter pipa udara (0,06 m)

- D_{nos} = diameter nosel bahan bakar (0,002 m)
- $D_{orifis\ jet}$ = diameter orifis saluran udara tangensial (0,0272 m)
- D_{jet} = diameter saluran jet tangensial (0,003 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 (0,008 m)
- A_{nos} = luas nosel bahan bakar ($3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$)
- A_{ud} = luas pipa udara aksial ($2,826 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$)
- $A_{orifis\ jet}$ = luas orifis aliran 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 data pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi sebesar 60° .

A. Massa alir udara aksial pada ketinggian (Δh minyak) = 30 mm

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

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

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

$$v = (0,514) \frac{(0,02)^2}{(0,06)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 30) / 1000}{1,208 \cdot (1 - (0,333)^4)}} = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{udara} = 1,208 \text{ [kg.m}^{-3}] \cdot 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2] \cdot 1,158 \text{ [m.s}^{-1}] = 3,952 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$$

B. Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *lift off* ($\dot{m}_{bahan\ bakar}$):

$$\dot{m}_{bahan\ bakar} = \rho_{bb} \cdot A_{nos} \cdot v, \text{ dengan } \Delta h = 22 \text{ mm (Hg)}$$

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

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

$$v = (0,507) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 22) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 4,442 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{bahan\ bakar} = 2,009 \text{ [kg.m}^{-3}] \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2] \cdot 4,442 \text{ [m.s}^{-1}] = 2,802 \cdot 10^{-5} \text{ kg.s}^{-1}$$

C. Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *blow off* ($\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$):

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \rho_{\text{bb}} \cdot A_{\text{nos}} \cdot v, \text{ dengan } \Delta h = 142 \text{ mm (Hg)}$$

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

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

$$v = (0,548) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 142) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 12,217 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 2,009 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2] \cdot 12,217 [\text{m.s}^{-1}] = 7,707 \cdot 10^{-5} \text{ kg.s}^{-1}$$

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

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

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

$$\beta = \frac{d_{\text{ud}}}{D_{\text{ud}}} = \frac{0,008 \text{ m}}{0,0272 \text{ m}} = 0,294$$

$$v_{\text{orifice}} = (0,346) \frac{(0,008)^2}{(0,0272)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 2) / 1000}{1,208 \cdot (1 - (0,294)^4)}} = 0,631 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{udara orifice}} = 1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 5,808 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \cdot 0,631 [\text{m.s}^{-1}] = 4,433 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

Jadi untuk kecepatan total saluran udara tangensial adalah:

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

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

$$1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 5,808 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \cdot 3,247 [\text{m.s}^{-1}] = 1,208 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 4(7,065 \cdot 10^{-6}) [\text{m}^2] \cdot v_{\text{jet}}$$

$$4,433 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1} = 3,414 \cdot 10^{-5} [\text{kg.m}^{-1}] \cdot v_{\text{jet}}$$

$$v_{\text{jet}} = 12,987 [\text{m.s}^{-1}]$$

Untuk kecepatan masing-masing *tangential air jet inlets* adalah $3,247 [\text{m.s}^{-1}]$

Dengan cara yang sama maka data hasil perhitungan dari hasil penelitian dapat dilihat pada lampiran 6 – 9.

4.1.1.3. Visualisasi api

Visualisasi api digunakan untuk mengetahui karakter api pada berbagai kondisi,

sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi *annulus jet* pada tiap-tiap variasi penelitian yang dilakukan.

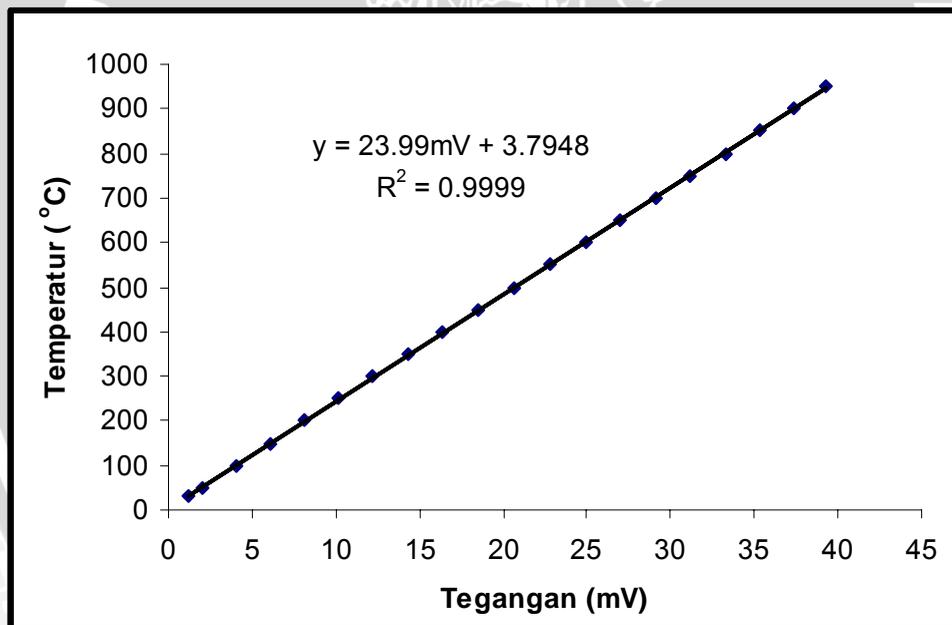
4.1.2. Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

4.1.2.1. Data penelitian

Untuk tiap titik pengamatan diperoleh 300 data temperatur yang ditampilkan dalam grafik fluktuasi temperatur (lampiran 10 s/d lampiran 25). Dari data temperatur diambil nilai rata-ratanya, sehingga dapat diketahui distribusi temperatur ke arah horisontal.

4.1.2.2. Kalibrasi temperatur

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



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

Persamaan yang diperoleh dari grafik pada gambar 4.1 adalah:

$$T = 23.99\text{mV} + 3.7948$$

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

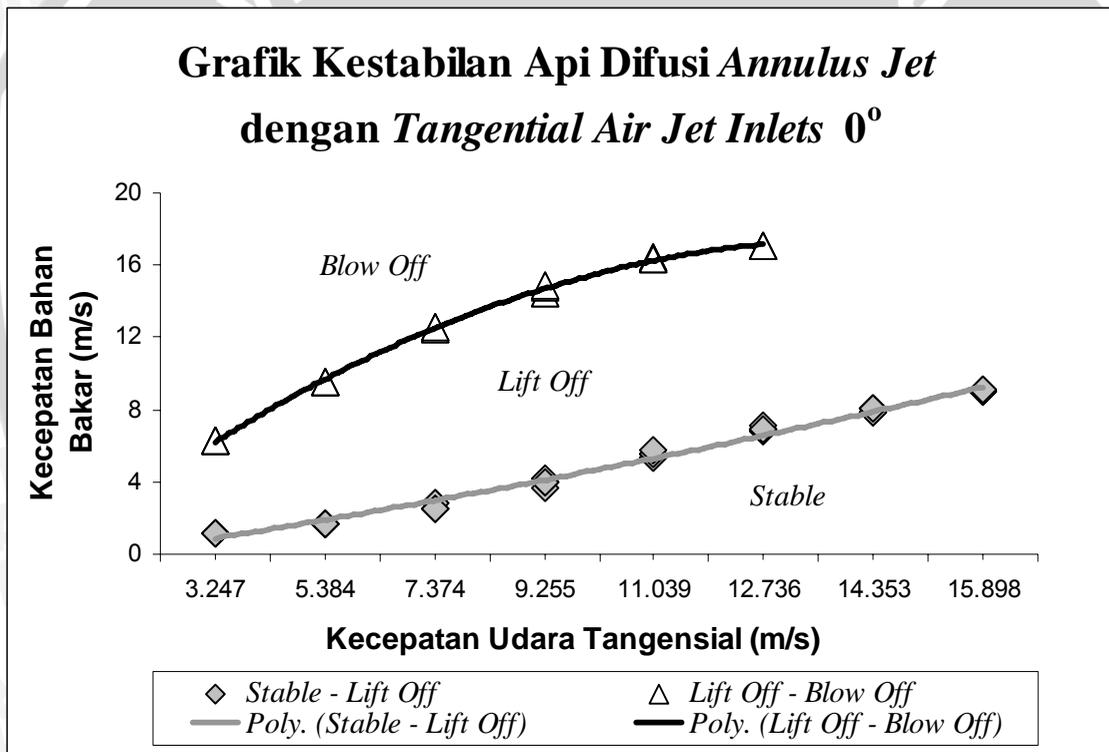
Dari persamaan yang telah diperoleh tersebut kemudian dimasukkan ke bahasa program dalam database *Analog to Digital Converter* (ADC), dimana ADC ini berfungsi untuk mengkonversikan sinyal tegangan dari sensor analog menjadi sinyal digital agar

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*.

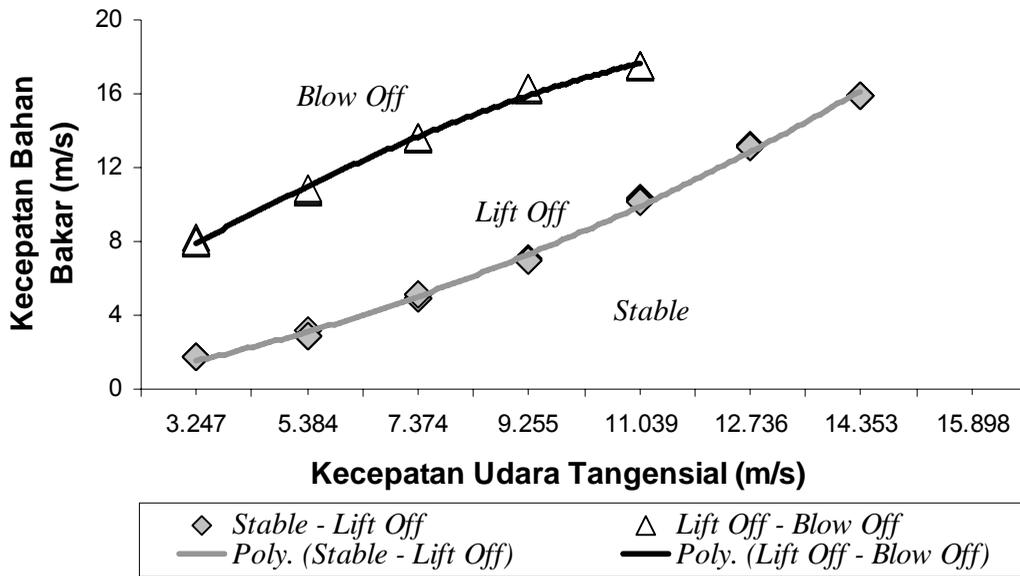
4.2. Pembahasan

4.2.1 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet*

Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* dibuat dengan menerangkan hubungan antara kecepatan aliran udara 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*.

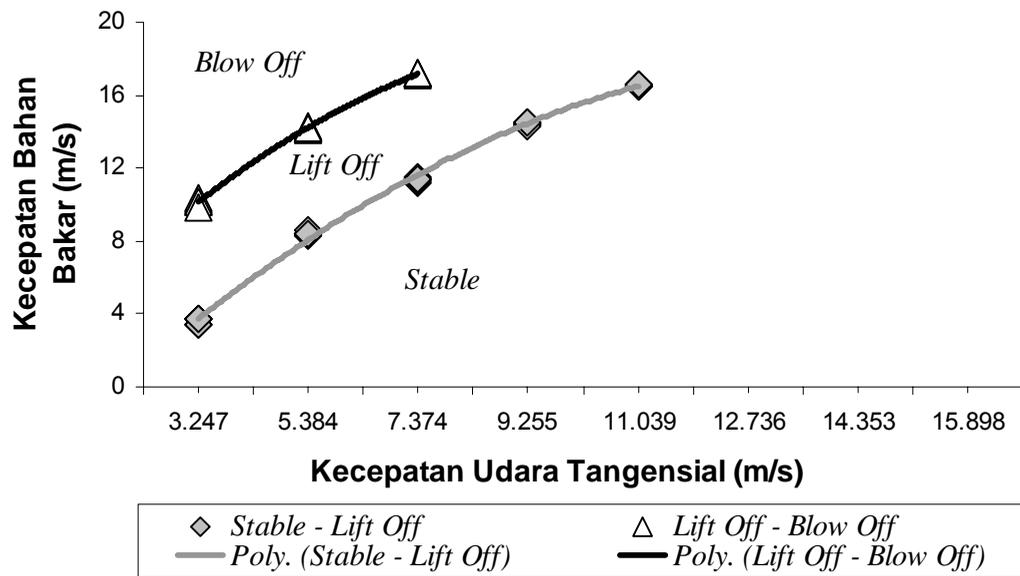


Grafik Kestabilan Api Difusi Annulus Jet dengan Tangential Air Jet Inlets 20°



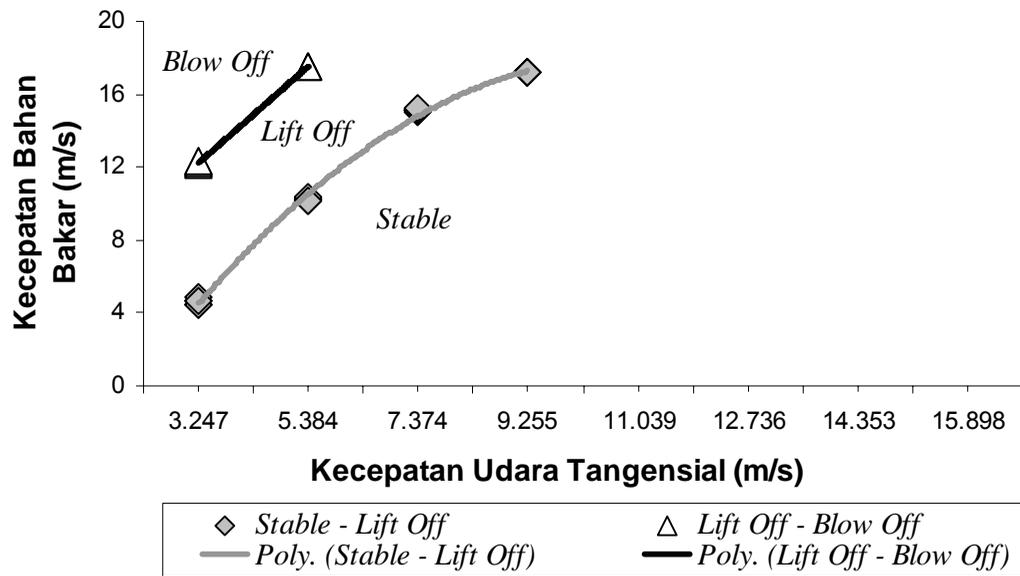
(b) Tangential air jet inlets 20°

Grafik Kestabilan Api Difusi Annulus Jet dengan Tangential Air Jet Inlets 40°



(c) Tangential air jet inlets 40°

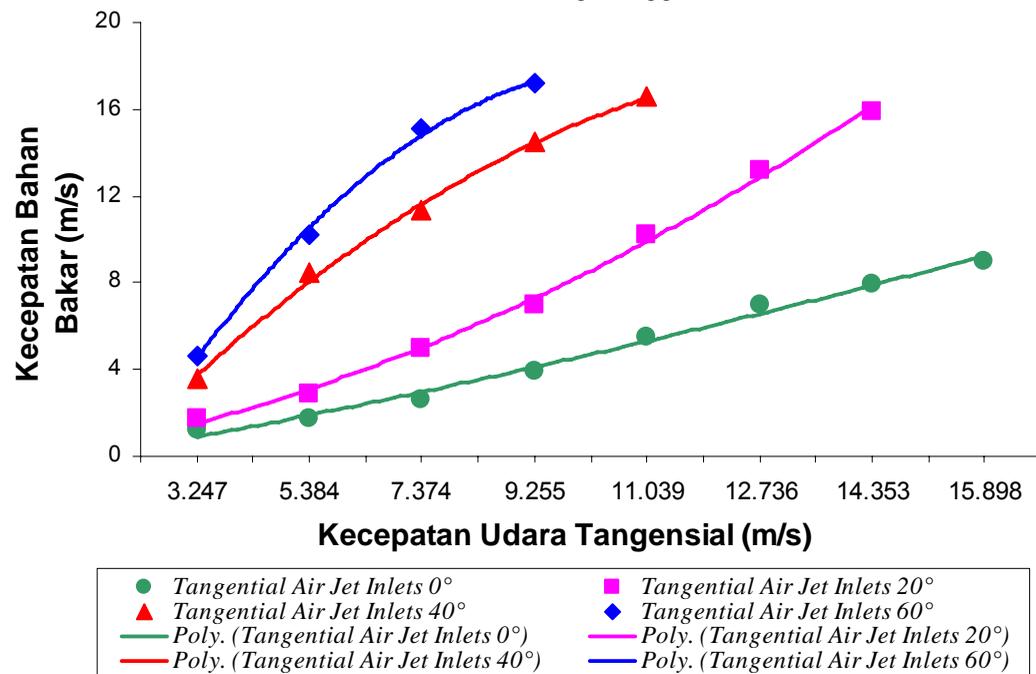
Grafik Kestabilan Api Difusi *Annulus Jet* dengan *Tangential Air Jet Inlets* 60°



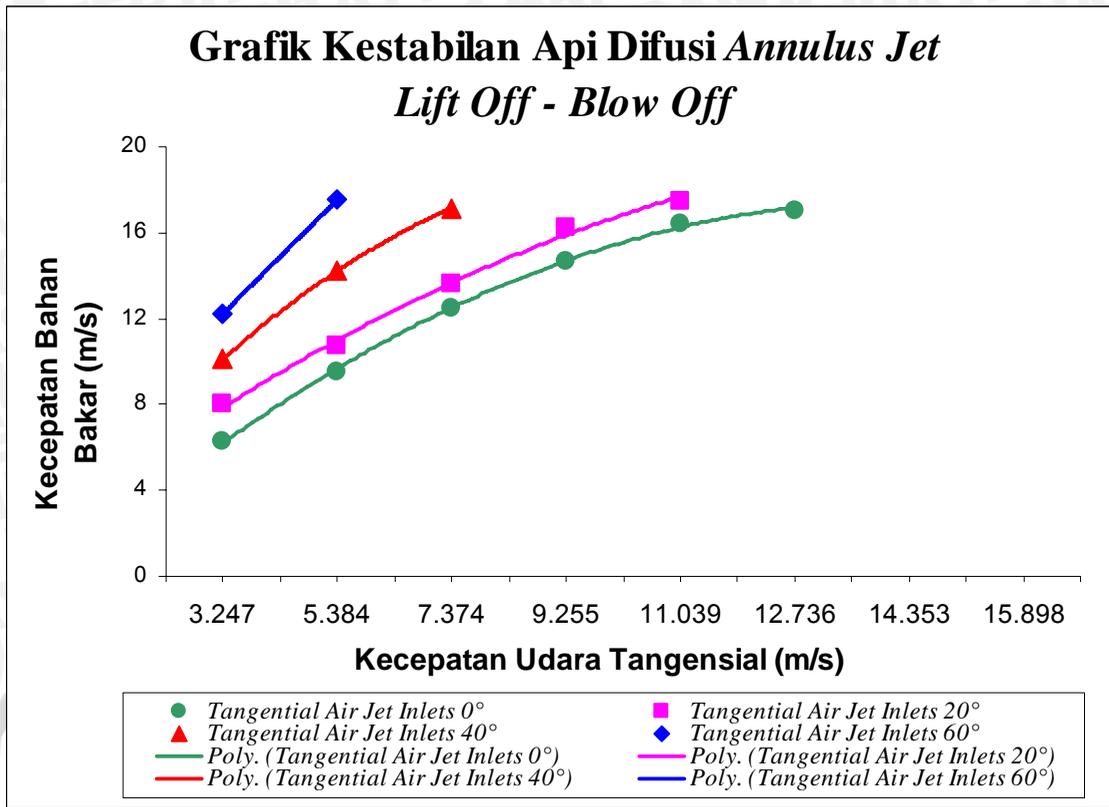
(d) *Tangential air jet inlets* 60°

Gambar 4.2 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*

Grafik Kestabilan Api Difusi *Annulus Jet* *Stable - Lift Off*



(a) *Stable - Lift Off*



(b) *Lift Off - Blow Off*

Gambar 4.3 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai kondisi

Gambar 4.2 (a), (b), (c) dan (d) menampilkan diagram kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*, yaitu dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0° , 20° , 40° dan 60° . Sumbu horisontal merupakan kecepatan aliran udara tangensial sedangkan sumbu vertikal adalah kecepatan aliran bahan bakar.

Pada gambar 4.2 (a) terlihat daerah api stabil, daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*. Semakin besar aliran udara tangensial maka *lift off* dan *blow off* memiliki kecenderungan semakin lambat terjadi. Hal ini dikarenakan semakin cepat aliran udara tangensial maka massa alir udara juga semakin besar, sehingga semakin banyak udara yang bereaksi dengan bahan bakar, akibatnya pembakaran yang terjadi juga semakin baik. Pada kecepatan aliran udara tangensial $3,247 \text{ m.s}^{-1}$ sampai dengan $15,898 \text{ m.s}^{-1}$ proses *lift off* dan *blow off* mempunyai batas beda kecepatan tertentu. Hal ini terjadi karena semakin cepat aliran udara tangensial, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya *Damköhler number* (Da) menjadi semakin besar, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) mencukupi dibandingkan waktu untuk mengalir (*characteristic flow time*). Hal ini mengakibatkan api

mempunyai batas kecepatan tertentu untuk mengalami perubahan dari kondisi *lift off* menuju *blow off* sehingga dapat diperoleh luasan daerah kestabilan.

Pada gambar 4.2 (a), (b), (c) dan (d) dapat dilihat bahwa pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi yang divariasikan membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Pada gambar 4.2 (a) grafik kestabilan dengan pemasangan *tangential air jet inlets* sudut inklinasi 0^0 terlihat bahwa luasan daerah kestabilan cukup kecil karena pada hampir seluruh kecepatan aliran udara tangensial antara $3,247 \text{ m.s}^{-1}$ sampai dengan $15,898 \text{ m.s}^{-1}$ terjadi kondisi *lift off* pada setiap penambahan bahan bakar kemudian diikuti kondisi *blow off* apabila bahan bakar terus ditambah. Dan hanya pada kecepatan aliran udara yang tinggi antara $14,353 \text{ m.s}^{-1}$ sampai dengan $15,898 \text{ m.s}^{-1}$ tidak terjadi *blow off* melainkan hanya terjadi *lift off*. Pada kondisi lain dengan pemasangan *tangential air jet inlets* sudut inklinasi 20^0 , 40^0 dan 60^0 pada gambar 4.2 (b), (c) dan (d) semakin besar aliran udara tangensial maka luasan daerah kestabilan menjadi lebih besar begitu juga kondisi *blow off* semakin sulit terjadi walaupun bahan bakar terus ditambah. Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut yang kecil belum terlihat pengaruh sudut inklinasi karena aliran *swirl* yang ditimbulkan belum mampu menimbulkan aliran resirkulasi yang cukup berarti untuk meningkatkan proses difusi.

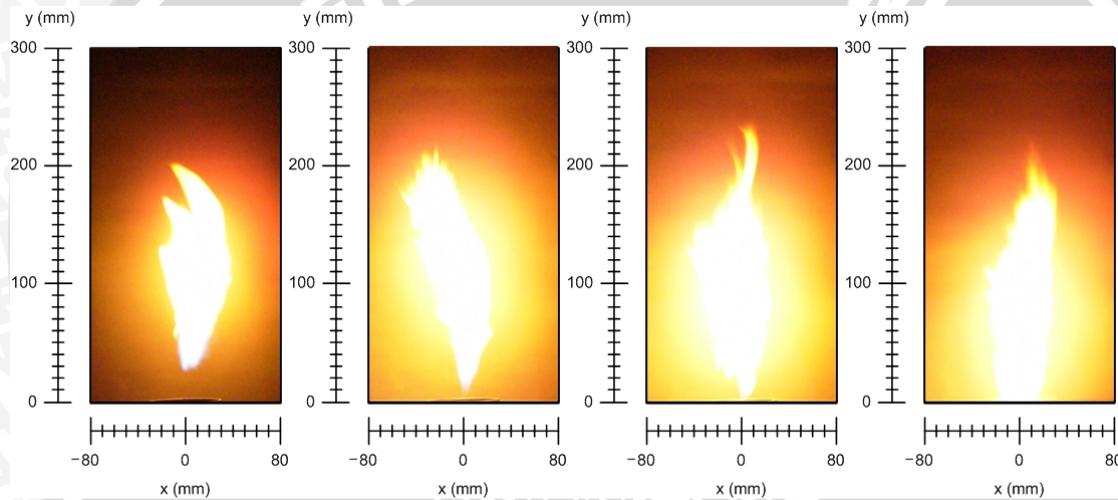
Pada gambar 4.2 (f) terlihat bahwa pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60^0 memiliki luasan daerah kestabilan api yang paling luas. Pada kecepatan aliran udara tangensial $5,384 \text{ m.s}^{-1}$ sampai dengan $15,898 \text{ m.s}^{-1}$ sudah tidak terlihat adanya *blow off*, sehingga api tetap menyala pada kondisi *lift off* meskipun bahan bakar mengalir pada kondisi maksimum. 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. Aliran udara yang mengalami resirkulasi karena pemasangan *tangential air jet inlets* mengakibatkan 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 baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986) bahwa semakin tinggi temperatur awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

Semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang digunakan, maka resirkulasi yang terjadi juga semakin besar. Hal ini akan mengakibatkan ketidakstabilan

pada aliran yang semakin besar pula. Ketidakstabilan aliran ini akan memperkuat proses pengadukan reaktan serta mengakibatkan aliran turbulen, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara lebih homogen akibat aliran *swirl* oleh aliran udara tangensial. Akibatnya pembakaran yang terjadi juga semakin baik dan luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Perbandingan luasan daerah kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets* ditunjukkan pada gambar 4.3 (a) dan (b). Secara keseluruhan dengan sudut inklinasi *tangential air jet inlets* 60° mempunyai luasan daerah kestabilan yang paling luas.

4.2.2 Visualisasi api difusi *annulus jet*

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



(a)

(b)

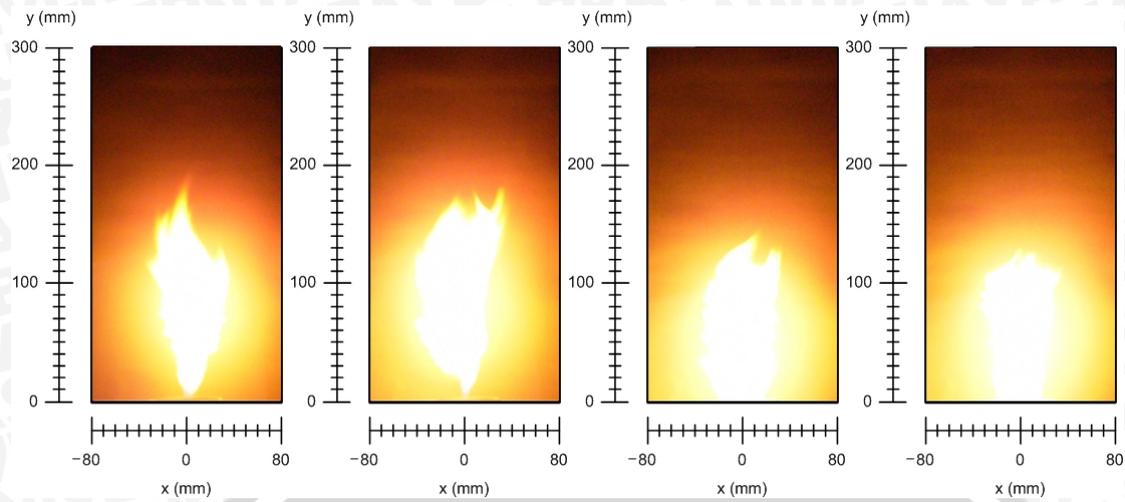
(c)

(d)

Gambar 4.4 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$

(a) *Tangential air jet inlets* 0°
 (c) *Tangential air jet inlets* 40°

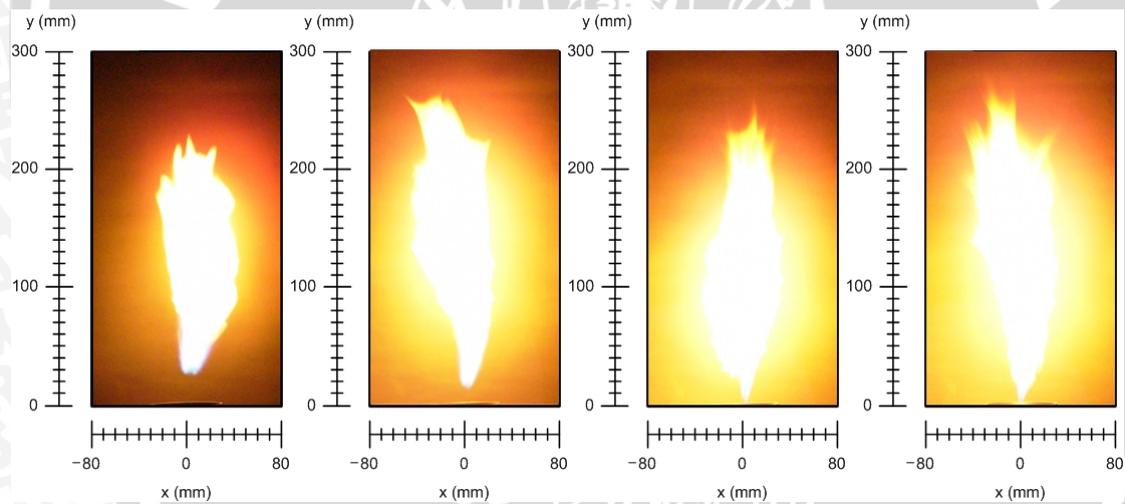
(b) *Tangential air jet inlets* 20°
 (d) *Tangential air jet inlets* 60°



(a) (b) (c) (d)

Gambar 4.5 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$

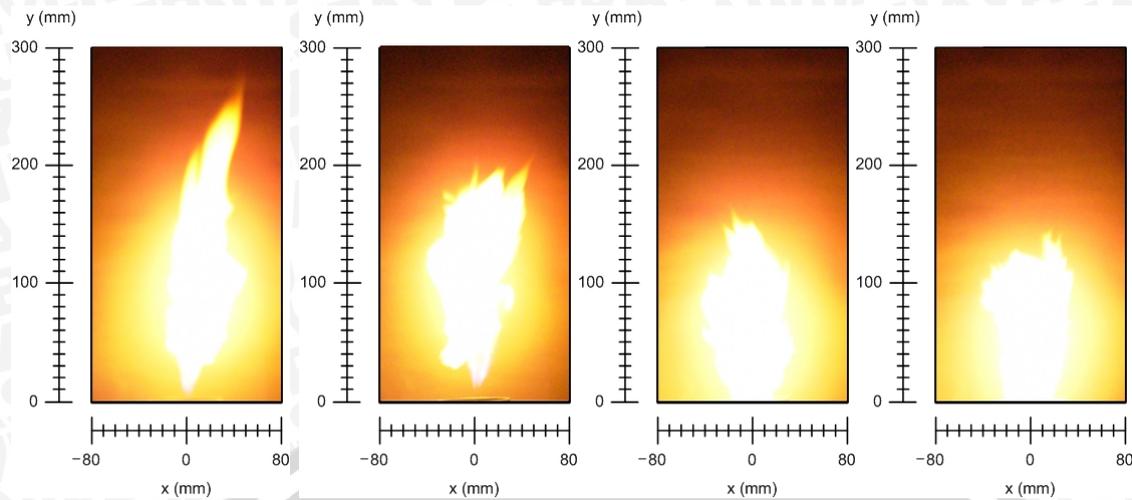
- (a) *Tangential air jet inlets* 0° (b) *Tangential air jet inlets* 20°
 (c) *Tangential air jet inlets* 40° (d) *Tangential air jet inlets* 60°



(a) (b) (c) (d)

Gambar 4.6 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$

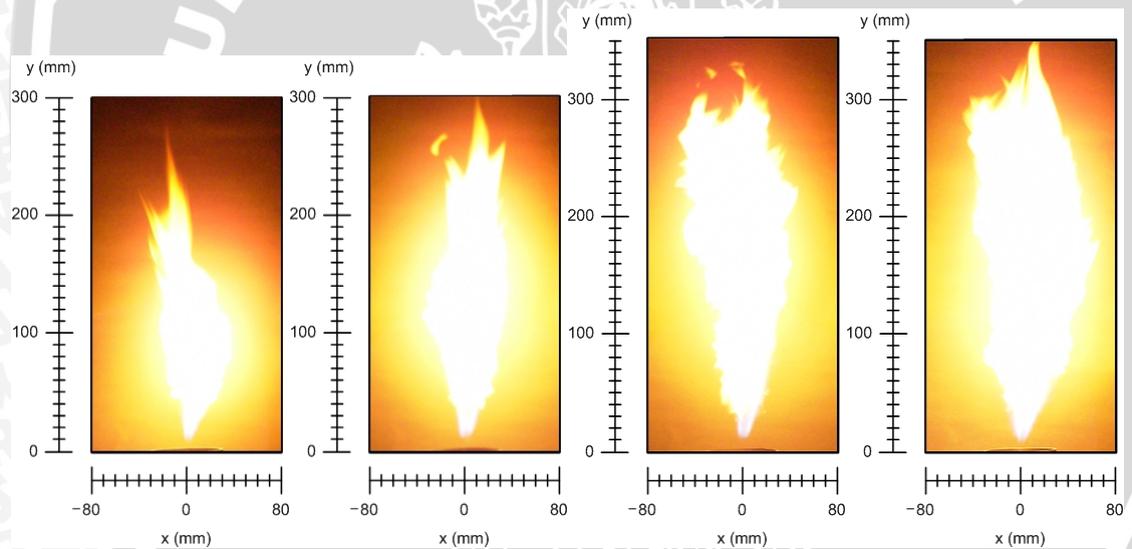
- (a) *Tangential air jet inlets* 0° (b) *Tangential air jet inlets* 20°
 (c) *Tangential air jet inlets* 40° (d) *Tangential air jet inlets* 60°



(a) (b) (c) (d)

Gambar 4.7 Visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlet*
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$

- (a) *Tangential air jet inlets* 0° (b) *Tangential air jet inlets* 20°
 (c) *Tangential air jet inlets* 40° (d) *Tangential air jet inlets* 60°



(a) (b) (c) (d)

Gambar 4.8 Visualisasi api *lift off* pada berbagai variasi sudut *tangential air jet inlet*
 (a) *Tangential air jet inlets* 0° , $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 3,695 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$
 (b) *Tangential air jet inlets* 20° , $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 6,093 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$
 (c) *Tangential air jet inlets* 40° , $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 9,441 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$
 (d) *Tangential air jet inlets* 60° , $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 12,058 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$

Pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 terlihat visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets* dengan kecepatan aliran bahan bakar dan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, sedangkan kecepatan aliran udara tangensial adalah $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$ untuk Gambar 4.4 dan $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$ untuk Gambar 4.5. Semakin besar sudut *tangential air jet inlets* yang digunakan maka api semakin pendek dan mengalami penebalan ke arah horisontal. Hal ini

dikarenakan semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* maka kecepatan tangensial dan aksial udara juga semakin besar, sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* akan meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar akan meningkatkan zona resirkulasi dan proses difusi, sehingga api mengalami pemendekan pada arah aksial dan penebalan pada arah horisontal. Pada $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$ pengaruh dari pemasangan *tangential air jet inlets* belum begitu terlihat, sehingga api yang terbentuk cenderung dalam kondisi *uniform*. Pada $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$ pengaruh resirkulasi mulai terlihat, sehingga semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* maka api yang terbentuk semakin pendek dan mengalami penebalan ke arah horisontal. Pada *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60° dapat terlihat dengan jelas efek resirkulasi yang terjadi karena pemasangan *tangential air jet inlets*.

Pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 terlihat visualisasi api pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets* dengan kecepatan aliran bahan bakar dan kecepatan aliran udara aksial yang sama, yaitu $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$ dan $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$ sedangkan kecepatan aliran udara tangensial adalah $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$ untuk Gambar 4.6 dan $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$ untuk Gambar 4.7. Api yang terbentuk pada $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$ cenderung lebih panjang dari pada $V = 2,129 \text{ m.s}^{-1}$. Hal ini dikarenakan semakin besar kecepatan aliran bahan bakar maka massa alirnya juga semakin besar, sehingga terjadi keseimbangan dan reaksi kimia antara bahan bakar dan udara yang semakin baik, akibatnya pembakaran berlangsung semakin mendekati sempurna.

Secara umum pada hampir semua kasus, warna api hampir seluruhnya didominasi warna kuning yang disebabkan oleh radiasi pembentukan jelaga yang hampir selalu terjadi pada pembakaran difusi. Pada kecepatan tangensial dan kecepatan bahan bakar yang rendah, api hampir seluruhnya berada pada kondisi *uniform* karena *tangential air jet inlets* yang hampir tidak berfungsi pada kecepatan tangensial yang rendah. Ketika kecepatan tangensial tinggi, maka pengaruh aliran udara tangensial mulai terlihat dimana api didominasi oleh kondisi api yang turbulen, akan tetapi ketika kecepatan bahan bakar dinaikkan pangkal api tetap bertahan pada kondisi *uniform*. Hal ini disebabkan karena pada aliran kecepatan bahan bakar yang cukup besar pengaruh aliran udara tangensial yang akan meningkatkan intensitas turbulensi dan zona resirkulasi pada pangkal api tidak cukup akibat pengaruh *shear flow* yang rendah.

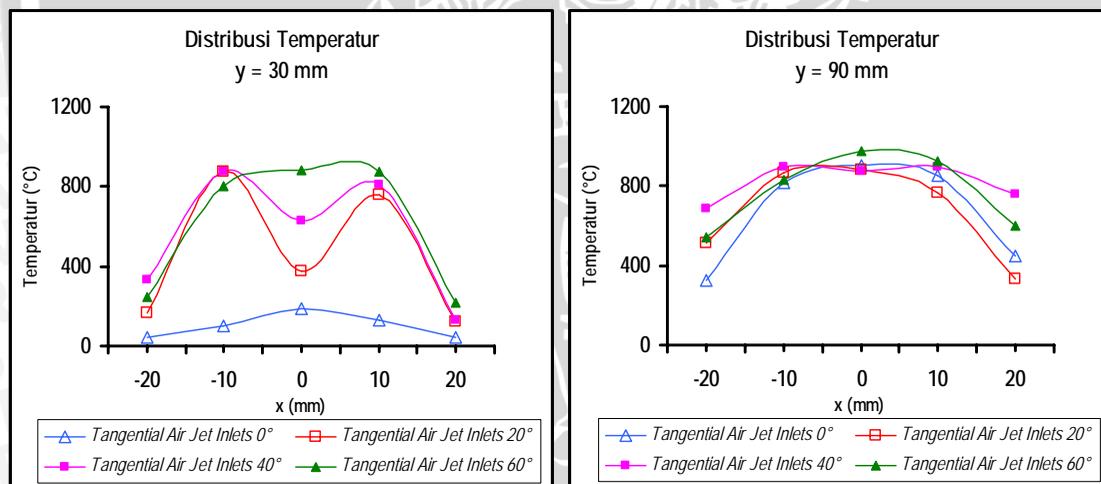
Ketika V dinaikkan lagi maka api akan mengalami *lift off* (Gambar 4.8). Saat kondisi *lift off*, struktur api secara umum lebih turbulen dari pada saat kondisi stabil, pangkal api masih berbentuk *uniform*. Hal ini dikarenakan kecepatan aliran bahan bakar

meningkat, sehingga angka Re juga akan meningkat, akibatnya api menjadi turbulen. Ketika V semakin tinggi, maka kondisi api menjadi sangat kaya bahan bakar, sehingga ada sebagian bahan bakar yang tidak terbakar dan terjadi *lift off*. Mekanisme *lift off* ini didasarkan pada ketidakseimbangan antara kecepatan aliran bahan bakar pada pangkal api dan kecepatan penyalaan dalam proses pencampuran antara aliran *jet* bahan bakar dan fluida pengoksidasi (Wijayanti, 2002). Hal ini karena pada dasarnya api memiliki kecenderungan untuk tetap bertahan *uniform*, sehingga dengan peningkatan kecepatan aliran bahan bakar yang tinggi, pangkal api tetap bertahan *uniform*. Ketika V dinaikkan lagi, maka proses pencampuran udara dan bahan bakar menjadi semakin tidak seimbang, sehingga api akan terus bergerak ke atas dan terjadi *lift off* semakin besar sampai api *blow off* (padam).

4.2.3. Distribusi temperatur api difusi *annulus jet*

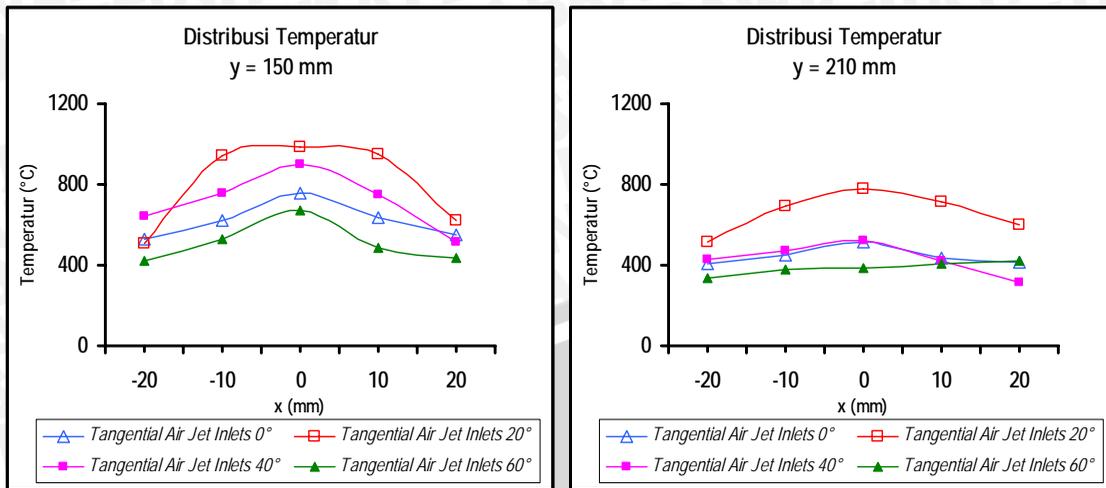
Data temperatur dari hasil percobaan diolah menjadi grafik untuk proses analisis. Grafik-grafik tersebut menunjukkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur.

4.2.3.1. Distribusi temperatur berdasar sudut inklinasi



(a) Posisi sensor pada y = 30 mm

(b) Posisi sensor pada y = 90 mm



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

(d) Posisi sensor pada $y = 210$ mm

Gambar 4.9 Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*

$$U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}, V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}, W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$$

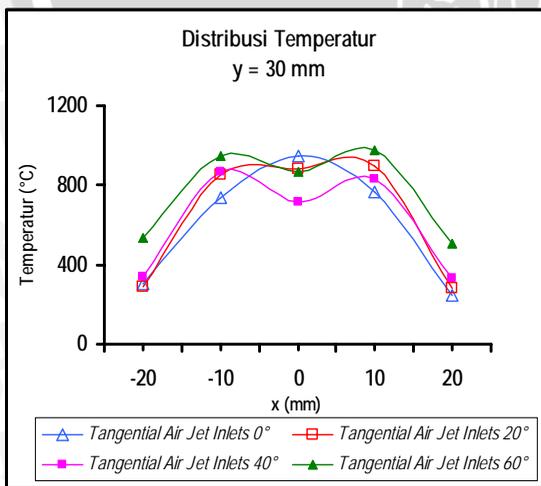
Gambar 4.9 (a), (b), (c) dan (d) menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*, yaitu pemasangan *tangential air jet inlets* dengan variasi sudut inklinasi 0° , 20° , 40° dan 60° serta dengan variasi peletakan sensor pada sumbu $y = 30$ mm, $y = 90$ mm, $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm. Kecepatan aliran udara aksial $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, kecepatan aliran bahan bakar $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$ dan kecepatan aliran udara tangensial $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$. Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu x , sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur.

Pada semua kasus terlihat bahwa pada sumbu api ($x = 0$ mm) cenderung memiliki temperatur yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada jarak tersebut *jet* bahan bakar memiliki kecepatan yang paling tinggi, sehingga terdapat banyak aliran massa bahan bakar, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara dapat berlangsung secara maksimal. Pada $x = -20$ mm dan $x = 20$ mm, rata-rata dihasilkan temperatur yang rendah karena pada jarak tersebut terdapat banyak suplai udara pembakaran, sehingga tidak semua atom-atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia dengan bahan bakar untuk menjadi produk pembakaran, akibatnya sejumlah kalor akan terbuang keluar sebagai akibat adanya pendinginan oleh aliran udara tersebut. Oleh karena itu cenderung terjadi temperatur rendah pada bagian tepi api ($x = -20$ mm dan $x = 20$ mm). Akan tetapi pada grafik distribusi temperatur $y = 30$ terlihat terjadi yang sebaliknya, hal ini disebabkan adanya efek resirkulasi aliran udara pada daerah terdekat dari *burner exit plane* oleh kecepatan aliran udara tangensial maupun aksial yang cukup besar dan tidak sebanding

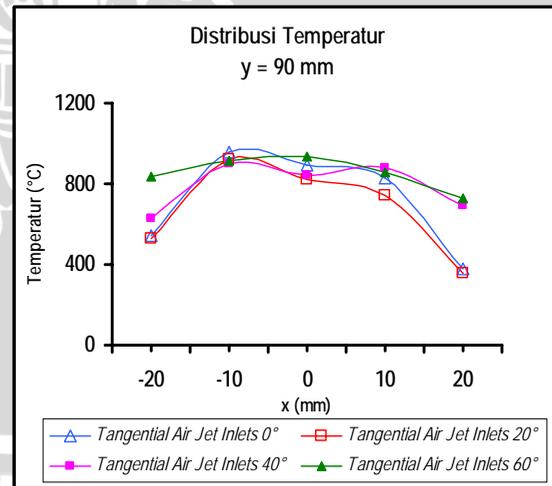
dengan besarnya kecepatan gas bahan bakar pada sumbu api ($x = 0$ mm) yang mempunyai temperatur cukup rendah sehingga proses difusi tidak berlangsung dengan baik, akibatnya ada penurunan temperatur pada sumbu api ($x = 0$). Efek resirkulasi ini mempengaruhi reaktan untuk bergerak ke arah tangensial sehingga terjadi proses difusi yang baik pada posisi $x = -10$ mm dan $x = 10$ mm. Efek resirkulasi dari aliran udara tangensial ini juga hanya terjadi pada distribusi temperatur $y = 30$ mm karena pada grafik distribusi temperatur $y = 90$ mm, $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm terlihat bahwa tidak terjadi penurunan temperatur pada sumbu api ($x = 0$).

Pada gambar 4.9 (c) dan (d) dapat dilihat bahwa distribusi temperatur yang terjadi semakin merata. Pada grafik distribusi temperatur $y = 210$ mm terlihat temperatur terdistribusi dengan merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang relatif rendah dibandingkan dengan distribusi temperatur pada $y = 30$ mm, $y = 90$ 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.

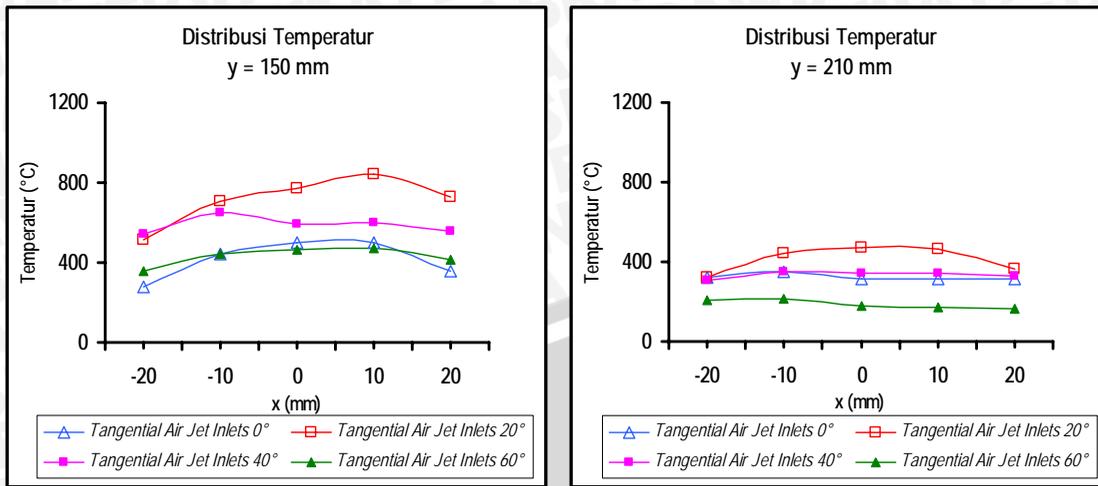
Pada kecepatan aliran udara yang rendah, efek dari pemasangan *tangential air jet inlets* belum begitu terlihat. Hal ini terlihat dari distribusi temperatur yang hampir sama pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*. Selanjutnya akan dapat diketahui pengaruh dari pemasangan *tangential air jet inlets* dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial. Hal ini dapat dilihat pada grafik 4.10 berikut ini:



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



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



(c) Posisi sensor pada y = 150 mm

(d) Posisi sensor pada y = 210 mm

Gambar 4.10 Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*

$$U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}, V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}, W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$$

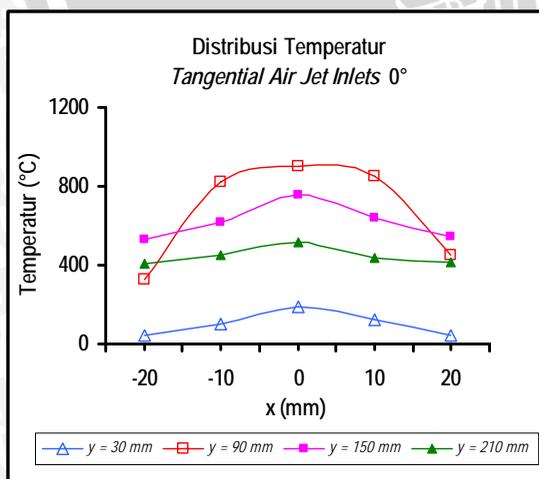
Pada kecepatan aliran udara yang tinggi dapat dilihat dengan jelas pengaruh pemasangan *tangential air jet inlets* terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan api (Gambar 4.10 (a), (b), (c) dan (d)). Semakin besar sudut inklinalasi *tangential air jet inlets*, temperatur terdistribusi secara merata ke arah horisontal. Hal ini terjadi karena kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh aliran udara tangensial maupun aksial mengakibatkan terjadinya batas gesekan (*shear layer*) yang lebih besar antara aliran resirkulasi dan daerah utama, sehingga banyak terjadi perpindahan panas antara gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar). Adanya pemanasan awal mengakibatkan terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat.. Hal ini sesuai dengan rumus energi kinetik yaitu $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ (Halliday,1978: 772), dengan k adalah *konstanta Boltzmann*. Dari rumus tersebut terlihat bahwa temperatur sebanding dengan energi kinetik molekul, jadi semakin tinggi energi kinetik dari molekul, maka temperatur juga akan semakin meningkat.

Pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinalasi 60° menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata daripada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinalasi 0°, 20° dan 40° tetapi temperatur yang terjadi cenderung lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya resirkulasi yang paling tepat pada kondisi tersebut dimana aliran udara tangensial yang dibawa dengan sudut inklinalasi 60° bergerak ke arah radial maupun aksial yang sesuai dengan kecepatan gas bahan bakar sehingga proses difusi yang terjadi menjadi lebih baik, maka api akan mengalami pemendekan ke

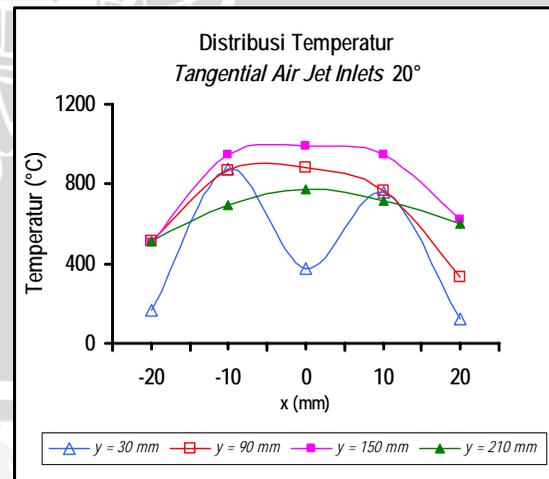
arah vertikal dan penebalan ke arah horisontal. Pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 0° , 20° dan 40° menghasilkan distribusi temperatur yang kurang merata karena aliran udara tangensial yang terjadi cenderung melingkar menjauh ke arah luar dari zona reaksi difusi dan proses transfer panas dari gas panas ke gas dingin yang tidak maksimal. Akibatnya proses difusi yang terjadi kurang merata sehingga sehingga temperatur tidak terdistribusi secara merata pula.

Secara keseluruhan dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial maka akan didapatkan distribusi temperatur yang lebih merata pada beberapa kondisi dengan pemasangan berbagai sudut inklinasi *tangential air jet inlets*. Hal ini disebabkan adanya kecepatan aliran udara aksial yang cukup besar memberikan efek resirkulasi baik itu arah tangensial maupun aksial yang cukup besar bagi reaktan sehingga meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi, akibatnya pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi yang kecil maka kecepatan reaksi dan kecepatan aliran tidak seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi menurun. Tetapi dengan pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi yang cukup besar, intensitas turbulensi tersebut justru meningkatkan kecepatan aliran yang seimbang antara kecepatan tangensial maupun aksial sehingga meningkatkan kecepatan reaksi dan proses difusi antara bahan bakar dan udara. Akibatnya terjadi pemendakan api ke arah vertikal dan penebalan api ke arah horisontal sehingga distribusi temperatur akan lebih merata.

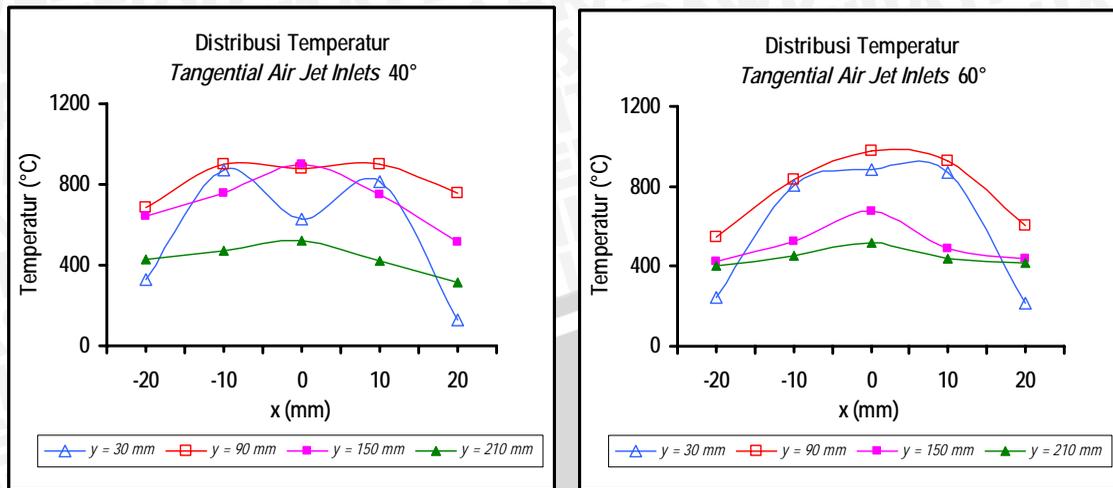
4.2.3.2. Distribusi temperatur berdasar jarak aksial



(a) *Tangential air jet inlets* 0°



(b) *Tangential air jet inlets* 20°



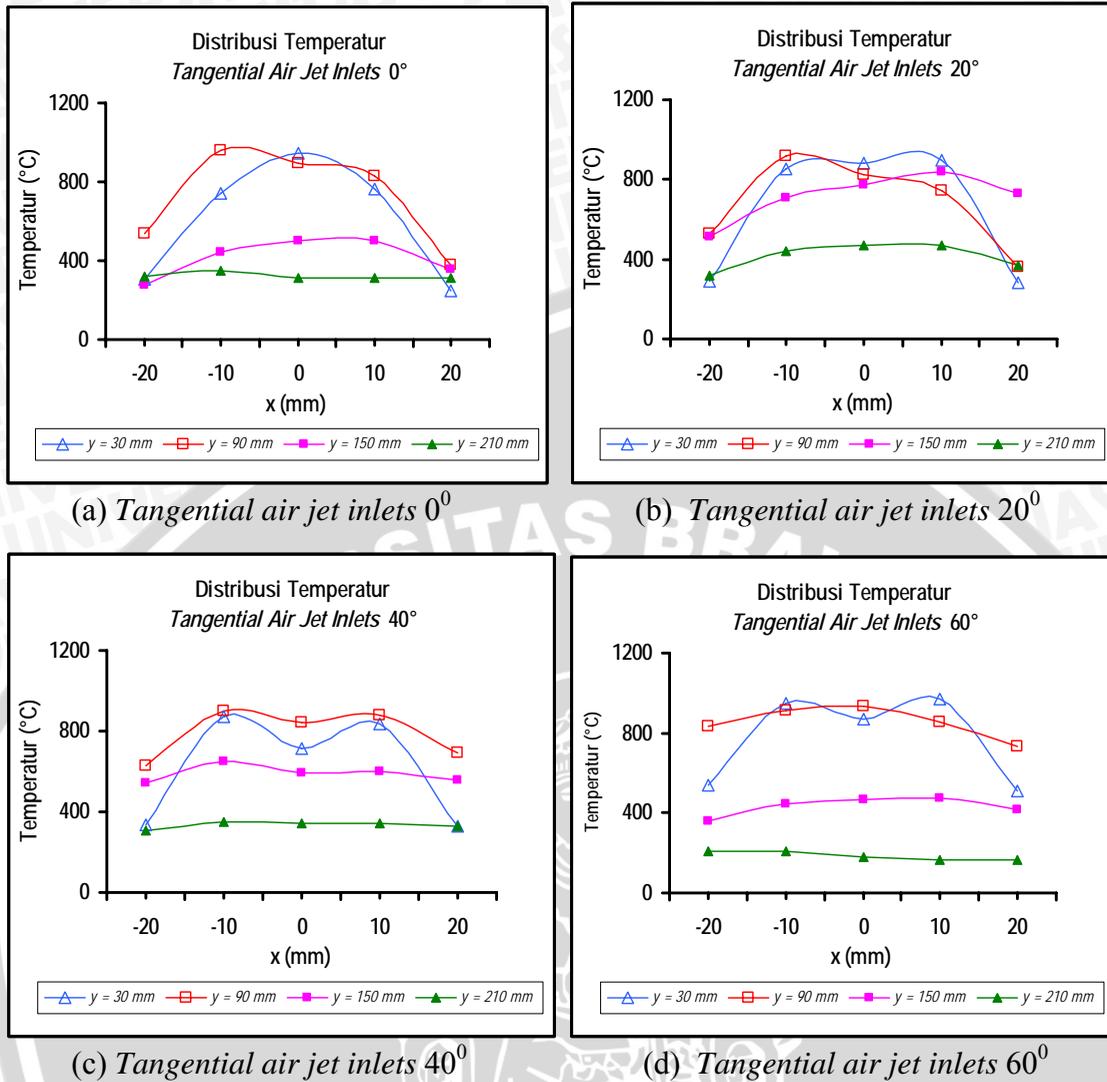
(c) Tangential air jet inlets 40°

(d) Tangential air jet inlets 60°

Gambar 4.11 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$

Gambar 4.11 (a), (b), (c) dan (d) menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi jarak aksial, yaitu pada sumbu $y = 30 \text{ mm}$, $y = 90 \text{ mm}$, $y = 150 \text{ mm}$ dan $y = 210 \text{ mm}$ serta dengan berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*, yaitu pemasangan *tangential air jet inlets* dengan variasi sudut inklinasi 0° , 20° , 40° dan 60° . Kecepatan aliran udara aksial $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, kecepatan aliran bahan bakar $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$ dan kecepatan aliran udara tangensial $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$. Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu x, sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur.

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa distribusi temperatur ke arah horisontal memiliki kecenderungan yang sama, yaitu temperatur terdistribusi secara merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang rendah pada jarak aksial 210 mm ($y = 210 \text{ mm}$). Hal ini dikarenakan jarak $y = 210 \text{ mm}$ merupakan jarak terjauh dari nosel, sehingga terdapat radiasi panas dari api yang terjadi lebih dekat dari nosel. Oleh karena itu, bagian pada tepi api akan mengalami peningkatan temperatur. Temperatur tertinggi terjadi pada $y = 90 \text{ mm}$.



Gambar 4.12 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$

Pada kecepatan aliran udara tangensial yang lebih besar $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$ (Gambar 4.12), pengaruh pemasangan *tangential air jet inlets* sangat jelas terlihat. Pada gambar 4.12 a, b, c dan d, distribusi temperatur cenderung memiliki keberagaman, yaitu pada $y = 30$ mm temperatur terendah terjadi pada bagian tepi api ($x = -20$ mm dan $x = 20$ mm) dengan tingkat perubahan temperatur yang tinggi. Hal ini disebabkan pada posisi tersebut terdapat banyak suplai udara pembakaran, sehingga tidak semua atom-atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia dengan bahan bakar untuk menjadi produk pembakaran, akibatnya sejumlah kalor akan terbuang keluar sebagai akibat adanya pendinginan oleh aliran udara tersebut. Selanjutnya pada seluruh pemasangan *tangential air jet inlets* pada $y = 90$ dan $y = 150$ mulai terlihat pengaruh sudut inklinasinya, yaitu semakin tinggi sudut tersebut maka distribusi temperatur semakin merata pada berbagai posisi horisontal. Hal ini disebabkan adanya pengaruh kecepatan aliran yang seimbang antara kecepatan tangensial maupun

aksial sehingga meningkatkan kecepatan reaksi dan proses difusi antara bahan bakar dan udara. Akibatnya terjadi pemendekan api ke arah vertikal dan penebalan api ke arah horisontal sehingga distribusi temperatur akan lebih merata seiring dengan kenaikan sudut inklinasi *tangential air jet inlets*. Pada posisi peletakan sensor untuk jarak $y = 210$ mm terlihat bahwa distribusi temperatur cukup merata pada berbagai pemasangan *tangential air jet inlets* dan memiliki temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan posisi $y = 30$ mm, $y = 90$ mm dan 150 mm. Hal ini disebabkan oleh kecepatan tangensial udara yang semakin besar dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 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 ($y = 210$ mm). Temperatur tertinggi terjadi pada jarak $y = 90$ mm, karena terjadi resirkulasi yang baik pada jarak tersebut 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 $y = 210$ mm, sedangkan temperatur tertinggi terjadi pada jarak $y = 90$ mm.

4.2.4. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet*

Lampiran 10 s/d lampiran 25 menunjukkan fluktuasi temperatur dari data yang diperoleh. Pada pemasangan *tangential air jet inlets* untuk aliran udara tangensial yang rendah $W = 5,384 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dan $y = 30$ mm temperatur cenderung tidak terlalu fluktuatif pada bagian tengah api. Hal ini berarti bahwa pada daerah tersebut api memiliki kestabilan yang baik, sehingga temperatur yang terukur berada disekitar nilai temperatur rata-rata data. 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, maka pembakaran yang terjadi lebih cepat dan hampir dalam waktu yang bersamaan. Kondisi ini terjadi juga pada bagian tepi api $x = -20$ mm dan $x = 20$ mm, karena pada posisi tersebut sensor temperatur berada di luar api, sehingga temperatur yang lebih dominan terukur adalah temperatur udara yang mengalir. Pada posisi sensor temperatur yang paling jauh dari nosel bahan bakar $y = 210$ mm, gerakan api dipengaruhi oleh *large eddy scale*, sehingga temperatur berfluktuasi semakin tinggi dari nilai rata-rata

temperatur. Pada saat temperatur yang terukur berada di bawah temperatur rata-rata data, berarti terdapat aliran udara masuk ke dalam api, sehingga temperatur udara yang lebih dominan terukur. Akan tetapi pada saat temperatur yang terukur berada di atas temperatur rata-rata data, berarti temperatur api yang lebih dominan terukur. Pada kecepatan aliran udara tangensial yang tinggi $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$ dan $y = 30 \text{ mm}$, temperatur pada bagian tengah api dan tepi api cenderung konstan. Sedangkan pada $x = -10 \text{ mm}$ dan $x = 10 \text{ mm}$ temperatur cenderung fluktuatif karena gerakan api dipengaruhi oleh *small eddy scale* dan *large eddy scale* pada aliran udara.

Semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* aliran udara semakin dipengaruhi oleh *small eddy scale*, walaupun masih terlihat adanya *large eddy scale* pada aliran udara. Hal ini bisa dilihat pada *tangential air jet inlets* 60° dengan kecepatan aliran udara $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$, fluktuasi temperatur yang terjadi mengindikasikan bahwa gerakan api semakin tidak teratur dengan tingkat *eddy scale* yang lebih kecil. Hal ini mengakibatkan api mempunyai tingkat kestabilan yang tinggi (Gambar 4.2 (d)). Begitu juga pada aliran udara tangensial yang tinggi $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$, gerakan api cenderung hanya dipengaruhi oleh *small eddy scale* pada aliran baik di bagian tengah maupun bagian tepi api sehingga temperatur cenderung tidak fluktuatif. Kondisi ini juga mengindikasikan bahwa gerakan api semakin tidak teratur sehingga menyebabkan tingkat kestabilan api meningkat pada kecepatan aliran udara tangensial yang tinggi. Oleh karena *small eddy scale* yang lebih banyak berperan, akibatnya pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60° memiliki tingkat kestabilan api yang paling tinggi dibandingkan dengan pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 0° , 20° dan 40° .

Secara keseluruhan fluktuasi temperatur 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.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

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

- Semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang dipasang pada *annulus* udara mengakibatkan kestabilan nyala pada api difusi *annulus jet* semakin meningkat, sehingga daerah kestabilan api terbesar diperoleh pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60° .
- Temperatur api difusi *annulus jet* semakin terdistribusi merata ke arah horisontal seiring dengan meningkatnya sudut inklinasi *tangential air jet inlets*, sehingga distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling merata diperoleh pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi 60° . Dari data temperatur juga didapatkan hasil bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada bagian tengah sumbu api.

5.2. Saran

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

- Variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang lebih besar pada pembakaran api difusi *annulus jet*.
- Karakteristik pola aliran fluida yang terjadi pada kombinasi aliran udara aksial dan aliran udara tangensial pada sebuah *annulus* udara dengan pemasangan *tangential air jet inlets*.
- Pengaruh pemasangan *tangential air jet inlets* dengan jarak dari *burner exit plane* yang bervariasi.
- Studi tentang emisi gas buang hasil pembakaran pada api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets*.

DAFTAR PUSTAKA

- Culp, Archie W., 1996, *Prinsip-prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga.
- Elbe, G. V. dan Lewis, Benard, 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press.
- Hedman, Paul O., Flores, D. V. dan Fletcher T. H., 2002, *Observation of Flames Behavior in A Laboratory*, Amsterdam, The Netherlands.
- Hifni, Mohammad, 1990, *Metode Statistika*, Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Holman, J.P., 1985, *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Holman, J.P., 1995, *Perpindahan Kalor*, Jakarta: Erlangga.
- Resnick, Halliday., 1986, *Physics for University*, New York: Mc Graw Hill.
- Kuo, Kenneth K., 1986, *Principles of Combustion*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lilley, David G., 1977, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA.
- Masri, A. R., et al., 2000, *Probability Density Function Computation of a Strongly Swirling Non Premixed Flame Stabilized on a New Burner*, Australia: Proceeding of Combustion Institute.
- Monnot, G., et al., 1985, *Principles of Turbulent Fired Heat*, Texas: Gulf Publishing Company.
- Milton, Brian E., 1995, *Thermodynamics, Combustion and Engines*, London: Chapman & Hall.
- 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., 1993, *Fluid Mechanic-An Introduction*, New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited.
- Solero, Giulio., et al., 2000, *Study of Injection typology on Turbulent Homogeneous Mixing in Natural Gas Swirl Burner*, Dipartimento di Energetica-Politecnico di Milano, Italy.
- 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.
- Tjokroawidjojo, Soetiari., 1986, *Bahan Bakar dan Proses-Proses Kimia Pembakaran*. Malang: Universitas Brawijaya.

- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : McGraw-Hill, Inc
- Wardana, I. N. G., 1995, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Widodo, A. S., 2004, *Pengaruh Posisi dan Sudut Kemiringan Swirl Terhadap Kestabilan Pancaran Api Difusi Double Concentric*, Malang: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Vol. 16 No. 2, Lembaga Penelitian Universitas Brawijaya.
- Widodo, A. S., 2005, *Hand Out Mata Kuliah Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wijayanti, W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Wijayanti, W., *Variasi Letak Central Fuel Tube Terhadap Concentric Annulus Tube Pada Pergeseran Daerah Kestabilan Api Difusi Dengan Bahan Bakar LPG*, Malang: Jurnal Teknik Vol. X No. 3, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html.



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 ($\text{kg.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)	Massa Jenis (kg.m^{-3})
Udara		28,97	1,208
Propana	C_3H_8	44,099	1,887
<i>n</i> -Butana	C_4H_{10}	58,126	2,495

Sumber: Culp, 1996: 468

$$\frac{A}{F} = \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}}$$

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

$$= 15,567 \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}}$$

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

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

$$\begin{aligned} \text{HHV}_m &= 0,7 (\text{HHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{HHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (12.034) + 0,3 (11.632) \\ &= 11.973,4 \text{ kcal.m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LHV}_v &= 0,7 (\text{LHV})_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,3 (\text{LHV})_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= 0,7 (22.370) + 0,3 (29.540) \\ &= 24.521 \text{ kcal.m}^{-3} \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}v &= \frac{(0,08315 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(300 \text{ K})}{(1 \text{ atm})(1,0133 \text{ bar} \cdot \text{atm}^{-1})(48,3071 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})} \\ &= 0,4999 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \\ \rho &= \frac{1}{v} = 2,009 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}\end{aligned}$$



Lampiran 2. Data hasil penelitian dengan *tangential air jet inlets* 0°

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet</i> Inlets (mmHg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	Bahan Bakar					
		<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
		ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}	ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}
2	30	2	1.187	1.187	40	6.275	6.275
		2	1.187		40	6.275	
		2	1.187		42	6.452	
		2	1.187		42	6.452	
		2	1.187		40	6.275	
4	30	4	1.711	1.711	86	9.557	9.557
		4	1.711		88	9.672	
		4	1.711		86	9.557	
		4	1.711		86	9.557	
		4	1.711		86	9.557	
6	30	8	2.495	2.628	148	12.448	12.507
		8	2.495		152	12.596	
		10	2.827		150	12.522	
		10	2.827		148	12.448	
		8	2.495		150	12.522	
8	30	18	3.955	3.953	224	14.478	14.687
		16	3.695		228	14.843	
		18	3.955		224	14.478	
		20	4.203		226	14.795	
		18	3.955		228	14.843	
10	30	30	5.317	5.478	312	16.379	16.405
		32	5.519		318	16.459	
		30	5.317		318	16.459	
		32	5.519		312	16.379	
		34	5.716		310	16.352	
12	30	48	6.959	6.958	372	17.042	17.071
		46	6.794		378	17.092	
		48	6.959		380	17.108	
		50	7.121		376	17.075	
		48	6.959		372	17.042	
14	30	60	7.881	7.967			
		62	8.024				
		62	8.024				
		60	7.881				
		62	8.024				
16	30	76	8.956	9.006			
		78	9.081				
		76	8.956				
		76	8.956				
		78	9.081				

Lampiran 3. Data hasil penelitian dengan *tangential air jet inlets* 20°

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet</i> Inlets (mmHg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	Bahan Bakar					
		<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
		ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}	ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}
2	30	4	1.711	1.711	60	7.881	8.024
		4	1.711		62	8.024	
		4	1.711		64	8.165	
		4	1.711		62	8.024	
		4	1.711		62	8.024	
4	30	10	2.827	2.888	108	10.727	10.707
		10	2.827		106	10.629	
		12	3.134		106	10.629	
		10	2.827		108	10.727	
		10	2.827		110	10.825	
6	30	26	4.894	4.980	184	13.667	13.606
		28	5.109		180	13.544	
		26	4.894		180	13.544	
		26	4.894		182	13.606	
		28	5.109		184	13.667	
8	30	48	6.959	7.024	306	13.667	16.283
		50	7.121		300	13.544	
		50	7.121		302	13.544	
		48	6.959		308	13.606	
		48	6.959		310	13.667	
10	30	96	10.113	10.198	456	17.499	17.494
		98	10.219		448	17.477	
		100	10.324		452	17.489	
		98	10.219		458	17.505	
		96	10.113		456	17.500	
12	30	168	13.157	13.157			
		170	13.224				
		166	13.091				
		168	13.157				
		168	13.157				
14	30	280	15.887	15.887			
		278	15.853				
		280	15.887				
		282	15.922				
		280	15.887				
16	30						

Lampiran 4. Data hasil penelitian dengan *tangential air jet inlets* 40°

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	Bahan Bakar					
		<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
		ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}	ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}
2	30	16	3.695	3.586	96	10.113	10.133
		14	3.423		98	10.219	
		16	3.695		100	10.324	
		14	3.423		96	10.113	
		16	3.695		92	9.896	
4	30	68	8.438	8.438	204	14.239	14.228
		66	8.303		200	14.130	
		68	8.438		208	14.346	
		70	8.571		202	14.185	
		68	8.438		204	14.239	
6	30	122	11.382	11.346	388	17.169	17.157
		118	11.201		380	17.108	
		120	11.292		390	17.183	
		124	11.471		386	17.154	
		122	11.382		388	17.169	
8	30	212	14.450	14.460			
		216	14.552				
		210	14.398				
		208	14.346				
		216	14.552				
10	30	328	16.587	16.552			
		320	16.486				
		322	16.512				
		326	16.562				
		330	16.611				
12	30						
14	30						
16	30						

Lampiran 5. Data hasil penelitian dengan *tangential air jet inlets* 60°

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet</i> Inlets (mmHg)	ΔH Manometer Udara Aksial (mm minyak)	Bahan Bakar					
		<i>Lift Off</i>			<i>Blow Off</i>		
		ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}	ΔH (mmHg)	V (m/s)	\bar{X}
2	30	22	4.442	4.625	142	12.217	12.248
		24	4.672		140	12.139	
		22	4.442		146	12.372	
		26	4.894		142	12.217	
		24	4.672		144	12.295	
4	30	96	10.113	10.198	484	17.547	17.548
		98	10.219		480	17.544	
		98	10.219		486	17.549	
		100	10.324		490	17.552	
		96	10.113		488	17.550	
6	30	242	15.157	15.148			
		238	15.070				
		242	15.157				
		240	15.114				
		246	15.243				
8	30	386	17.154	17.163			
		390	17.183				
		386	17.154				
		388	17.169				
		386	17.154				
10	30						
12	30						
14	30						
16	30						

Lampiran 6. Data kecepatan dan massa alir dengan *tangential air jet inlets* 0°

Data 1

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.187	6.275	0.00044338	0.0039526	0.0001873	0.0009896
4	5.384	1.158	1.711	9.557	0.00073522	0.0039526	0.0002698	0.0015073
6	7.374	1.158	2.495	12.448	0.00100698	0.0039526	0.0003936	0.0019631
8	9.255	1.158	3.955	14.748	0.00126380	0.0039526	0.0006237	0.0023259
10	11.039	1.158	5.317	16.379	0.00150743	0.0039526	0.0008386	0.0025831
12	12.736	1.158	6.959	17.042	0.00173910	0.0039526	0.0010976	0.0026877
14	14.353	1.158	7.881		0.00195991	0.0039526	0.0012429	
16	15.898	1.158	8.956		0.00217088	0.0039526	0.0014125	

Data 2

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.187	6.275	0.00044338	0.0039526	0.0001873	0.0009896
4	5.384	1.158	1.711	9.557	0.00073522	0.0039526	0.0002698	0.0015254
6	7.374	1.158	2.495	12.596	0.00100698	0.0039526	0.0003936	0.0019866
8	9.255	1.158	3.695	14.843	0.00126380	0.0039526	0.0005828	0.0023408
10	11.039	1.158	5.519	16.459	0.00150743	0.0039526	0.0008705	0.0025958
12	12.736	1.158	6.794	17.092	0.00173910	0.0039526	0.0010715	0.0026955
14	14.353	1.158	8.024		0.00195991	0.0039526	0.0012655	
16	15.898	1.158	9.081		0.00217088	0.0039526	0.0014321	

Data 3

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.187	6.275	0.00044338	0.0039526	0.0001873	0.0010176
4	5.384	1.158	1.711	9.557	0.00073522	0.0039526	0.0002698	0.0015073
6	7.374	1.158	2.495	12.448	0.00100698	0.0039526	0.0004459	0.0019750
8	9.255	1.158	3.955	14.748	0.00126380	0.0039526	0.0006237	0.0023259
10	11.039	1.158	5.317	16.379	0.00150743	0.0039526	0.0008386	0.0025958
12	12.736	1.158	6.959	17.042	0.00173910	0.0039526	0.0010976	0.0026981
14	14.353	1.158	7.881		0.00195991	0.0039526	0.0012655	
16	15.898	1.158	8.956		0.00217088	0.0039526	0.0014125	

Data 4

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.187	6.275	0.00044338	0.0039526	0.0001873	0.0010176
4	5.384	1.158	1.711	9.557	0.00073522	0.0039526	0.0002698	0.0015073
6	7.374	1.158	2.495	12.448	0.00100698	0.0039526	0.0004459	0.0019631
8	9.255	1.158	3.955	14.748	0.00126380	0.0039526	0.0006629	0.0023334
10	11.039	1.158	5.317	16.379	0.00150743	0.0039526	0.0008705	0.0025831
12	12.736	1.158	6.959	17.042	0.00173910	0.0039526	0.0011231	0.0026930
14	14.353	1.158	7.881		0.00195991	0.0039526	0.0012429	
16	15.898	1.158	8.956		0.00217088	0.0039526	0.0014125	

Data 5

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.187	6.275	0.00044338	0.0039526	0.0001873	0.0009896
4	5.384	1.158	1.711	9.557	0.00073522	0.0039526	0.0002698	0.0015073
6	7.374	1.158	2.495	12.448	0.00100698	0.0039526	0.0003936	0.0019750
8	9.255	1.158	3.955	14.748	0.00126380	0.0039526	0.0006237	0.0023408
10	11.039	1.158	5.317	16.379	0.00150743	0.0039526	0.0009015	0.0025787
12	12.736	1.158	6.959	17.042	0.00173910	0.0039526	0.0010976	0.0026877
14	14.353	1.158	7.881		0.00195991	0.0039526	0.0012655	
16	15.898	1.158	8.956		0.00217088	0.0039526	0.0014321	



Lampiran 7. Data kecepatan dan massa alir dengan *tangential air jet inlets* 20°

Data 1

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.711	7.881	0.00044338	0.0039526	0.0002698	0.0012429
4	5.384	1.158	2.827	10.728	0.00073522	0.0039526	0.0004459	0.0016918
6	7.374	1.158	4.894	13.667	0.00100698	0.0039526	0.0007719	0.0021554
8	9.255	1.158	6.960	16.295	0.00126380	0.0039526	0.0010976	0.0025698
10	11.039	1.158	10.113	17.500	0.00150743	0.0039526	0.0015949	0.0027598
12	12.736	1.158	13.158		0.00173910	0.0039526	0.0020751	
14	14.353	1.158	15.888		0.00195991	0.0039526	0.0025056	
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 2

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.711	7.881	0.00044338	0.0039526	0.0002698	0.0012655
4	5.384	1.158	2.827	10.728	0.00073522	0.0039526	0.0004459	0.0016762
6	7.374	1.158	4.894	13.667	0.00100698	0.0039526	0.0008058	0.0021360
8	9.255	1.158	6.960	16.295	0.00126380	0.0039526	0.0011231	0.0025560
10	11.039	1.158	10.113	17.500	0.00150743	0.0039526	0.0016117	0.0027562
12	12.736	1.158	13.158		0.00173910	0.0039526	0.0020855	
14	14.353	1.158	15.888		0.00195991	0.0039526	0.0025002	
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 3

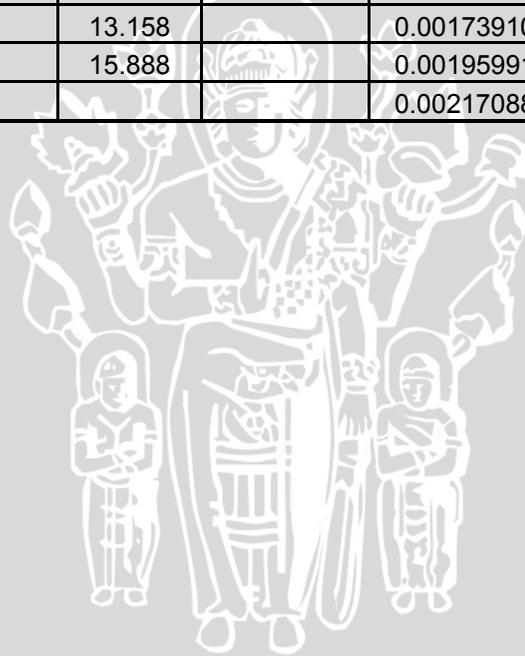
ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.711	7.881	0.00044338	0.0039526	0.0002698	0.0012876
4	5.384	1.158	2.827	10.728	0.00073522	0.0039526	0.0004943	0.0016762
6	7.374	1.158	4.894	13.667	0.00100698	0.0039526	0.0007719	0.0021360
8	9.255	1.158	6.960	16.295	0.00126380	0.0039526	0.0011231	0.0025606
10	11.039	1.158	10.113	17.500	0.00150743	0.0039526	0.0016282	0.0027581
12	12.736	1.158	13.158		0.00173910	0.0039526	0.0020645	
14	14.353	1.158	15.888		0.00195991	0.0039526	0.0025056	
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 4

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.711	7.881	0.00044338	0.0039526	0.0002698	0.0012655
4	5.384	1.158	2.827	10.728	0.00073522	0.0039526	0.0004459	0.0016918
6	7.374	1.158	4.894	13.667	0.00100698	0.0039526	0.0007719	0.0021458
8	9.255	1.158	6.960	16.295	0.00126380	0.0039526	0.0010976	0.0025743
10	11.039	1.158	10.113	17.500	0.00150743	0.0039526	0.0016117	0.0027606
12	12.736	1.158	13.158		0.00173910	0.0039526	0.0020751	
14	14.353	1.158	15.888		0.00195991	0.0039526	0.0025109	
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 5

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	1.711	7.881	0.00044338	0.0039526	0.0002698	0.0012655
4	5.384	1.158	2.827	10.728	0.00073522	0.0039526	0.0004459	0.0017072
6	7.374	1.158	4.894	13.667	0.00100698	0.0039526	0.0008058	0.0021554
8	9.255	1.158	6.960	16.295	0.00126380	0.0039526	0.0010976	0.0025787
10	11.039	1.158	10.113	17.500	0.00150743	0.0039526	0.0015949	0.0027598
12	12.736	1.158	13.158		0.00173910	0.0039526	0.0020751	
14	14.353	1.158	15.888		0.00195991	0.0039526	0.0025056	
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		



Lampiran 8. Data kecepatan dan massa alir dengan *tangential air jet inlets* 40°

Data 1

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	3.695	10.113	0.00044338	0.0039526	0.0005828	0.0015949
4	5.384	1.158	8.438	14.239	0.00073522	0.0039526	0.0013307	0.0022456
6	7.374	1.158	11.382	17.169	0.00100698	0.0039526	0.0017950	0.0027076
8	9.255	1.158	14.450		0.00126380	0.0039526	0.0022789	
10	11.039	1.158	16.587		0.00150743	0.0039526	0.0026159	
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 2

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	3.695	10.113	0.00044338	0.0039526	0.0005398	0.0016117
4	5.384	1.158	8.438	14.239	0.00073522	0.0039526	0.0013094	0.0022284
6	7.374	1.158	11.382	17.169	0.00100698	0.0039526	0.0017665	0.0026981
8	9.255	1.158	14.450		0.00126380	0.0039526	0.0022949	
10	11.039	1.158	16.587		0.00150743	0.0039526	0.0026000	
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 3

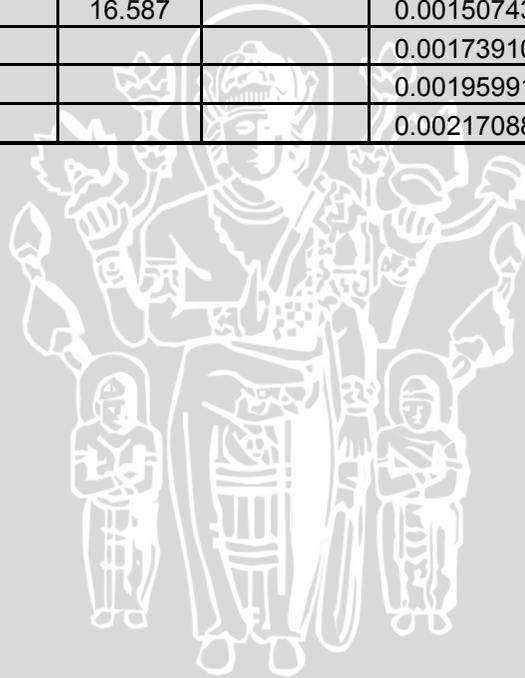
ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	3.695	10.113	0.00044338	0.0039526	0.0005828	0.0016282
4	5.384	1.158	8.438	14.239	0.00073522	0.0039526	0.0013307	0.0022625
6	7.374	1.158	11.382	17.169	0.00100698	0.0039526	0.0017809	0.0027099
8	9.255	1.158	14.450		0.00126380	0.0039526	0.0022707	
10	11.039	1.158	16.587		0.00150743	0.0039526	0.0026040	
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 4

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	3.695	10.113	0.00044338	0.0039526	0.0005398	0.0015949
4	5.384	1.158	8.438	14.239	0.00073522	0.0039526	0.0013517	0.0022371
6	7.374	1.158	11.382	17.169	0.00100698	0.0039526	0.0018090	0.0027053
8	9.255	1.158	14.450		0.00126380	0.0039526	0.0022625	
10	11.039	1.158	16.587		0.00150743	0.0039526	0.0026120	
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 5

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	3.695	10.113	0.00044338	0.0039526	0.0005828	0.0015607
4	5.384	1.158	8.438	14.239	0.00073522	0.0039526	0.0013307	0.0022456
6	7.374	1.158	11.382	17.169	0.00100698	0.0039526	0.0017950	0.0027076
8	9.255	1.158	14.450		0.00126380	0.0039526	0.0022949	
10	11.039	1.158	16.587		0.00150743	0.0039526	0.0026197	
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		



Lampiran 9. Data kecepatan dan massa alir dengan *tangential air jet inlets* 60°

Data 1

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	4.442	12.217	0.00044338	0.0039526	0.0007006	0.0019268
4	5.384	1.158	10.113	17.547	0.00073522	0.0039526	0.0015949	0.0027674
6	7.374	1.158	15.157		0.00100698	0.0039526	0.0023904	
8	9.255	1.158	17.154		0.00126380	0.0039526	0.0027053	
10	11.039	1.158			0.00150743	0.0039526		
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 2

ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	4.442	12.217	0.00044338	0.0039526	0.0007369	0.0019143
4	5.384	1.158	10.113	17.547	0.00073522	0.0039526	0.0016117	0.0027667
6	7.374	1.158	15.157		0.00100698	0.0039526	0.0023767	
8	9.255	1.158	17.154		0.00126380	0.0039526	0.0027076	
10	11.039	1.158			0.00150743	0.0039526		
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 3

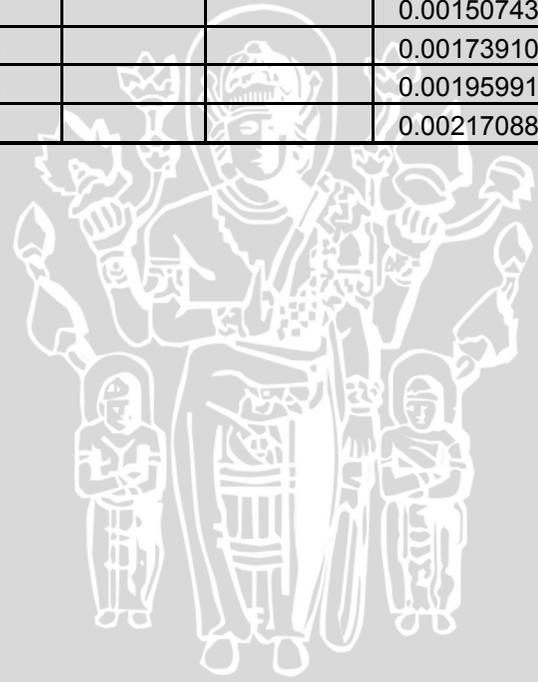
ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	4.442	12.217	0.00044338	0.0039526	0.0007006	0.0019512
4	5.384	1.158	10.113	17.547	0.00073522	0.0039526	0.0016117	0.0027676
6	7.374	1.158	15.157		0.00100698	0.0039526	0.0023904	
8	9.255	1.158	17.154		0.00126380	0.0039526	0.0027053	
10	11.039	1.158			0.00150743	0.0039526		
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 4

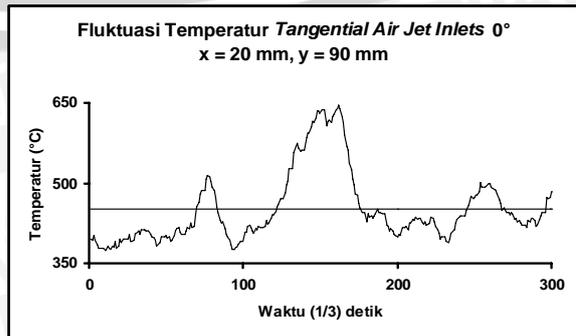
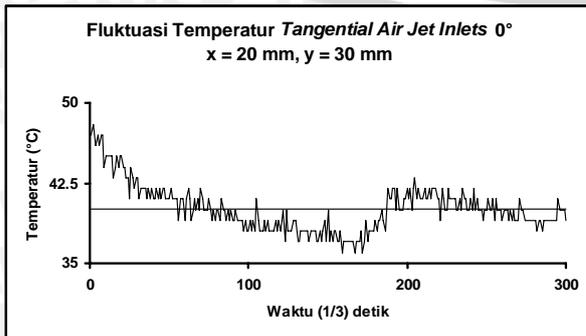
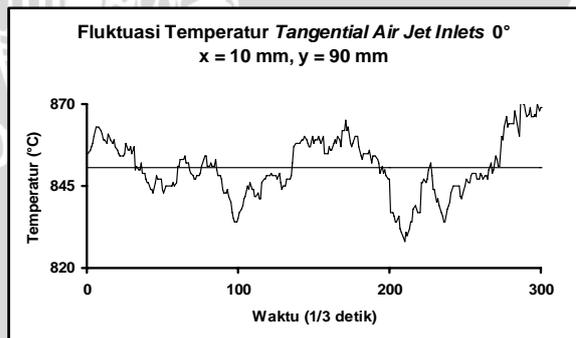
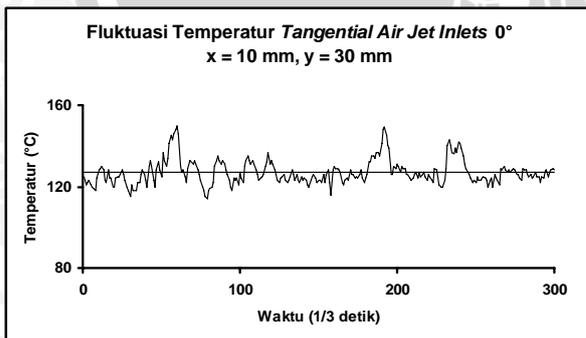
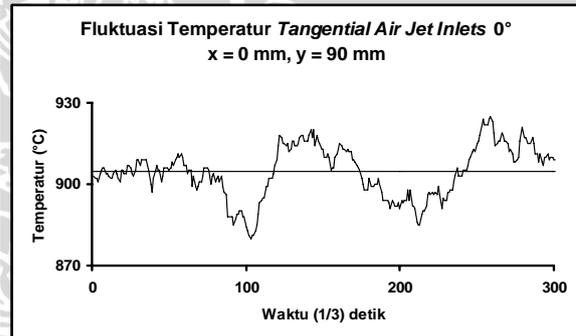
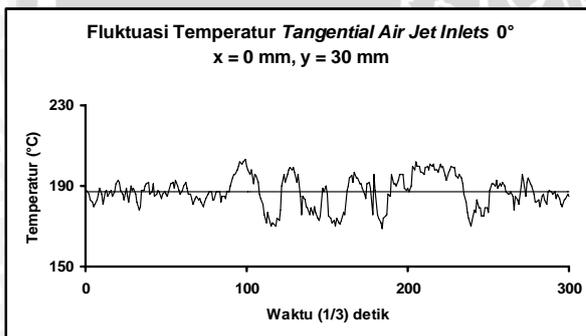
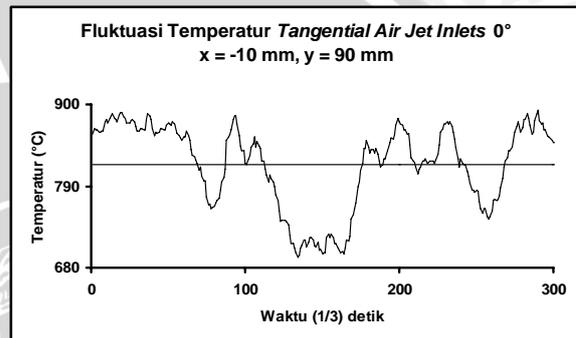
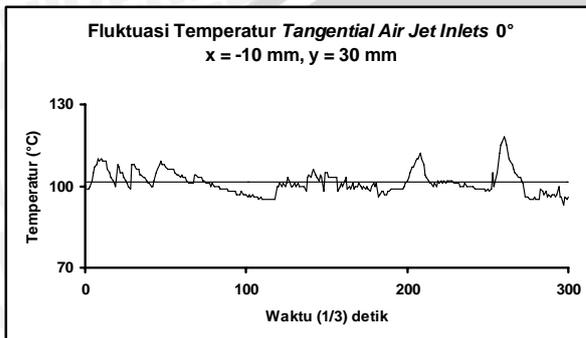
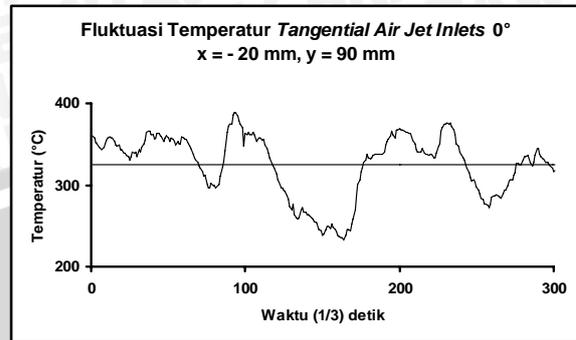
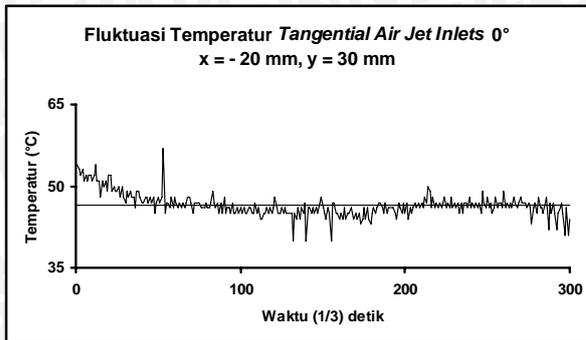
ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	4.442	12.217	0.00044338	0.0039526	0.0007719	0.0019268
4	5.384	1.158	10.113	17.547	0.00073522	0.0039526	0.0016282	0.0027680
6	7.374	1.158	15.157		0.00100698	0.0039526	0.0023836	
8	9.255	1.158	17.154		0.00126380	0.0039526	0.0027076	
10	11.039	1.158			0.00150743	0.0039526		
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		

Data 5

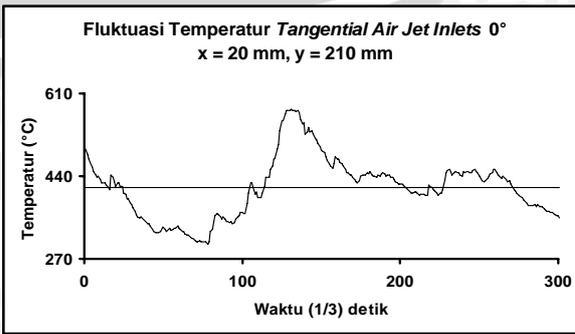
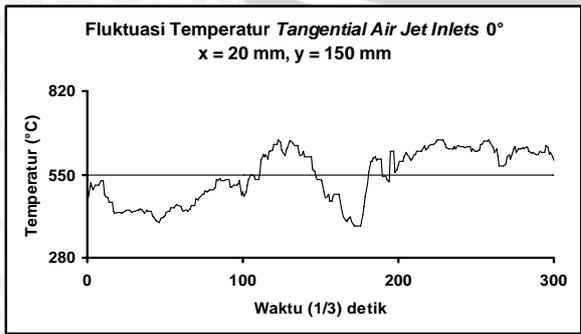
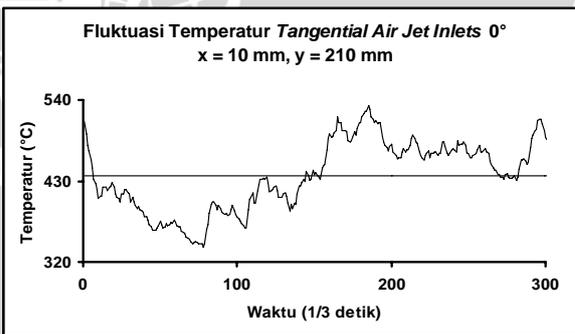
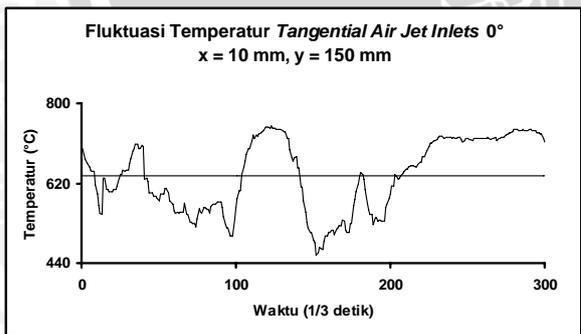
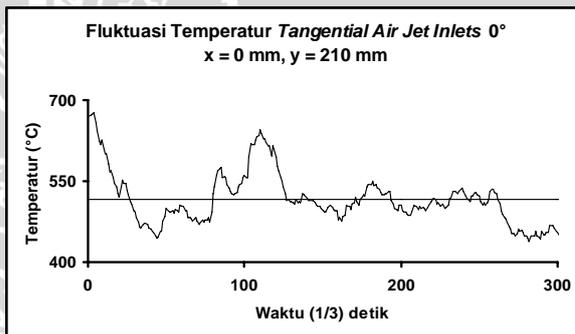
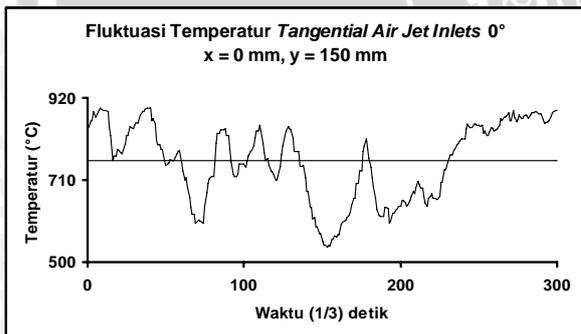
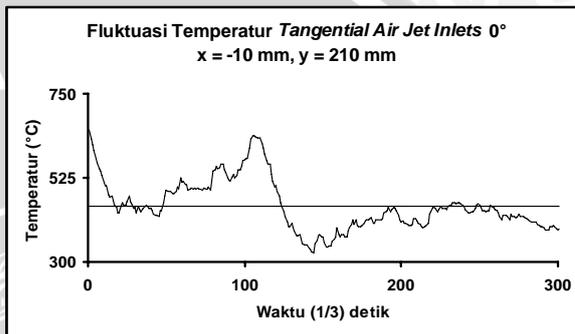
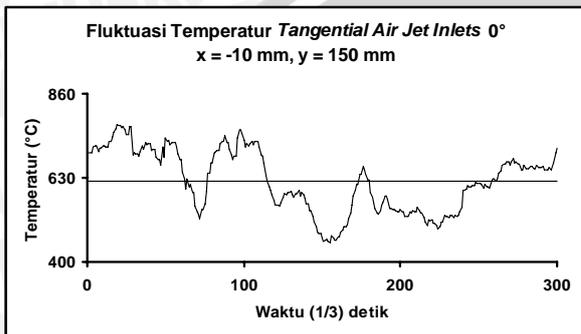
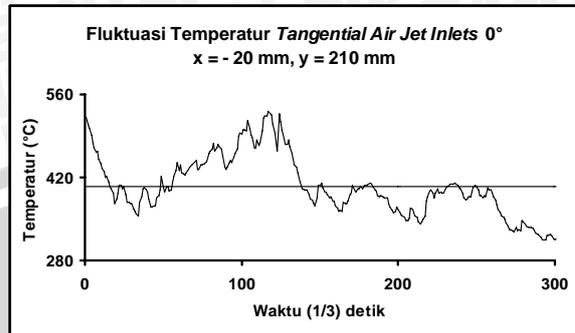
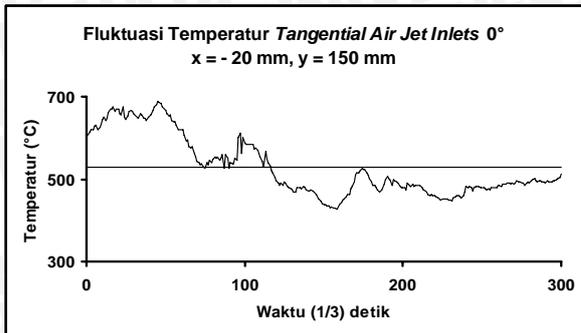
ΔH Manometer <i>Tangential Air Jet Inlets</i> (mmHg)	Kecepatan (m/s)				Massa Alir (kg/s)			
	Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar		Udara Tangensial	Udara Aksial	Bahan Bakar	
			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>			<i>Lift Off</i>	<i>Blow Off</i>
2	3.247	1.158	4.442	12.217	0.00044338	0.0039526	0.0007369	0.0019390
4	5.384	1.158	10.113	17.547	0.00073522	0.0039526	0.0015949	0.0027678
6	7.374	1.158	15.157		0.00100698	0.0039526	0.0024039	
8	9.255	1.158	17.154		0.00126380	0.0039526	0.0027053	
10	11.039	1.158			0.00150743	0.0039526		
12	12.736	1.158			0.00173910	0.0039526		
14	14.353	1.158			0.00195991	0.0039526		
16	15.898	1.158			0.00217088	0.0039526		



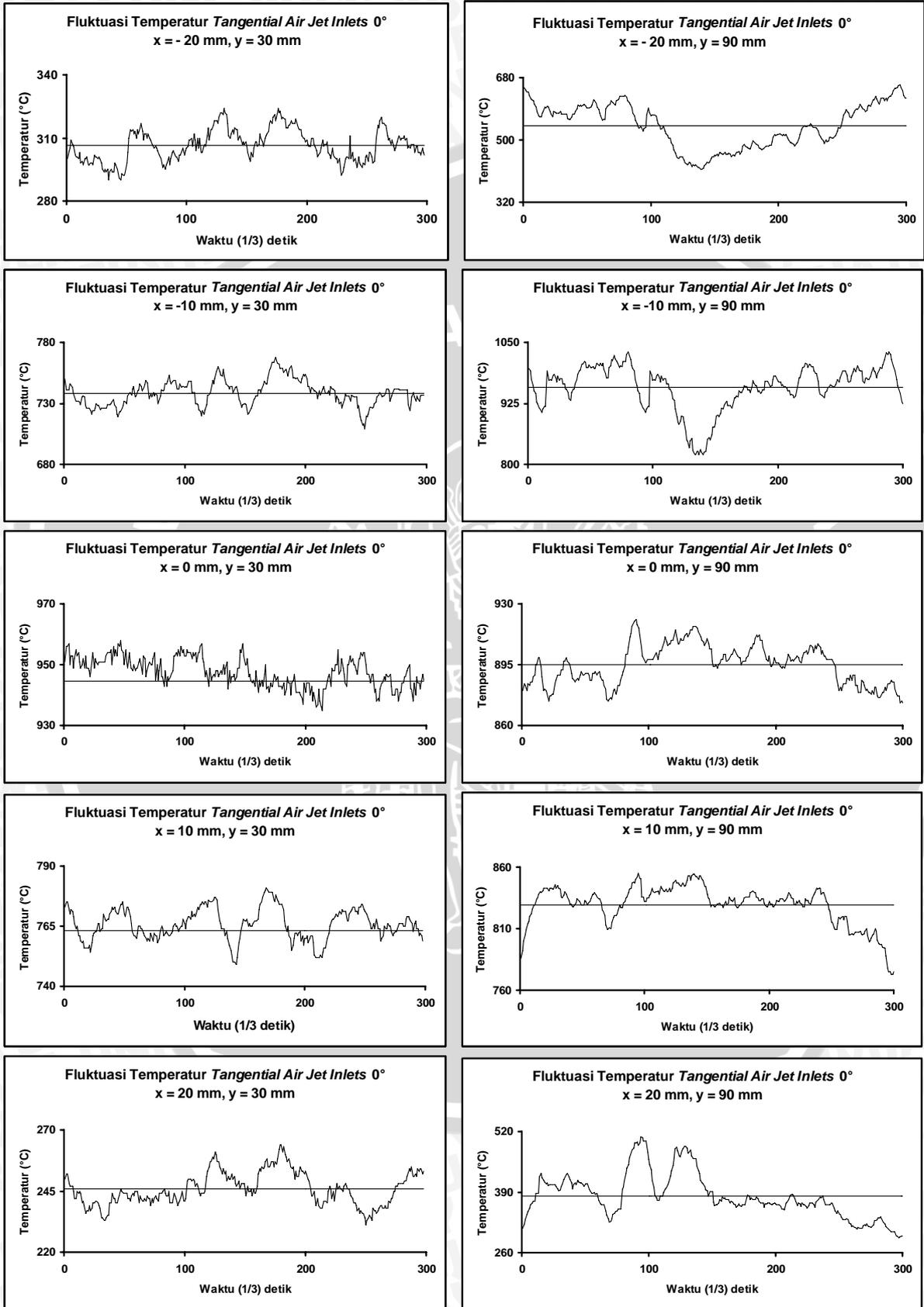
Lampiran 10. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



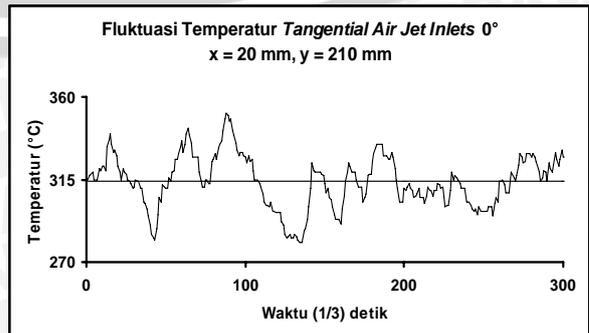
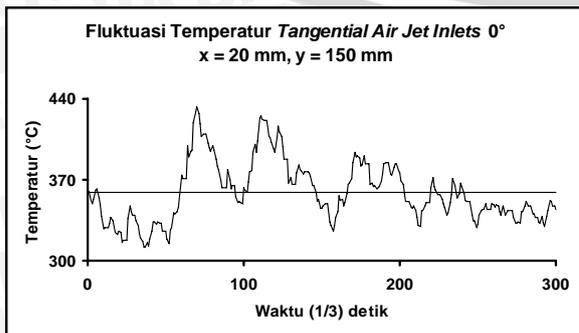
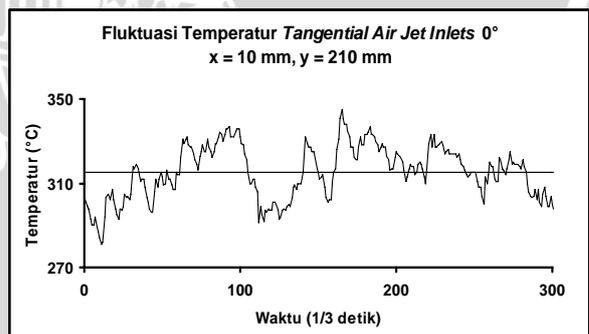
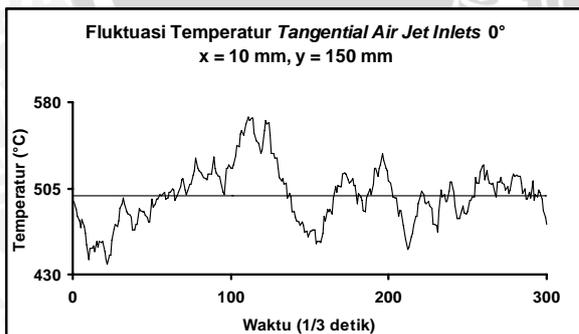
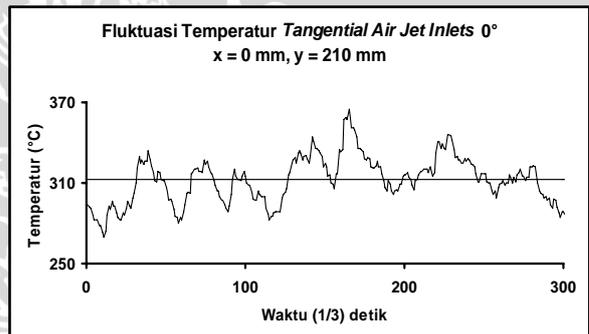
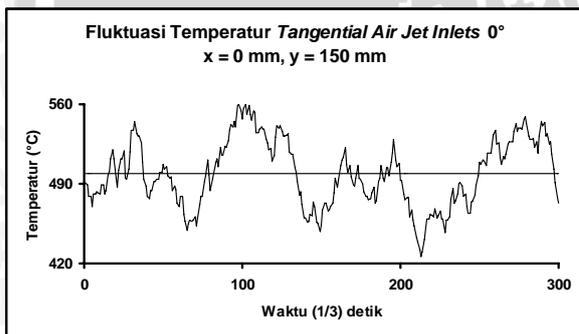
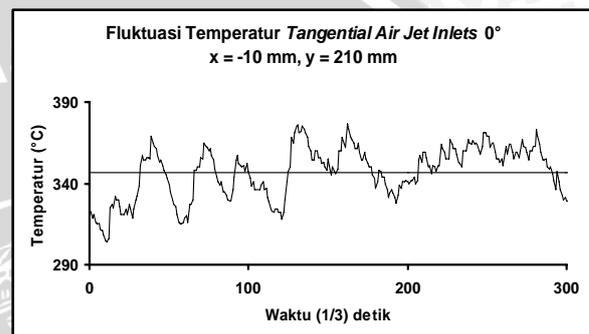
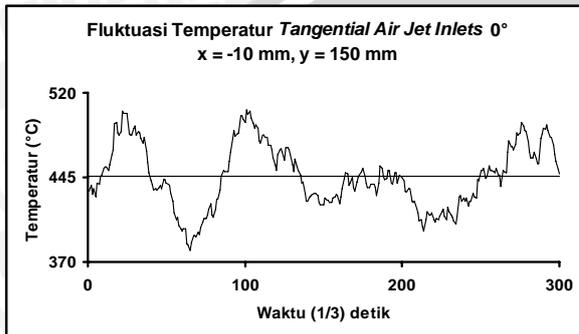
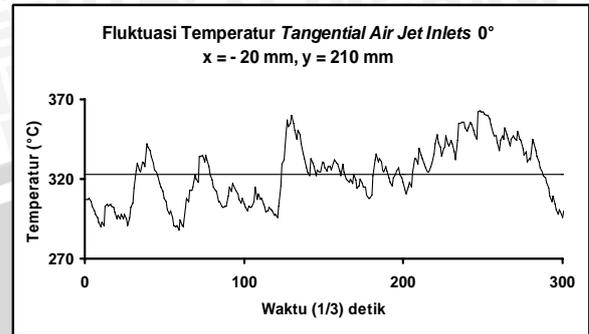
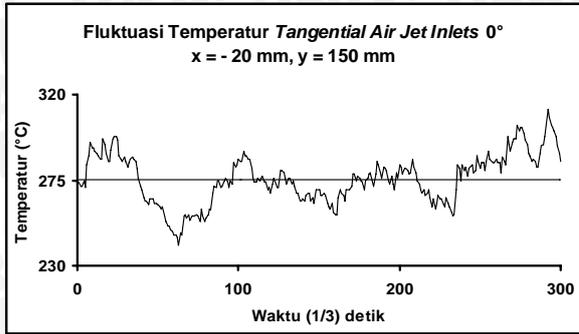
Lampiran 11. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



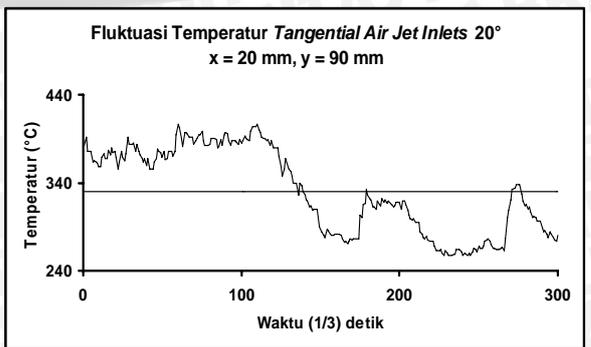
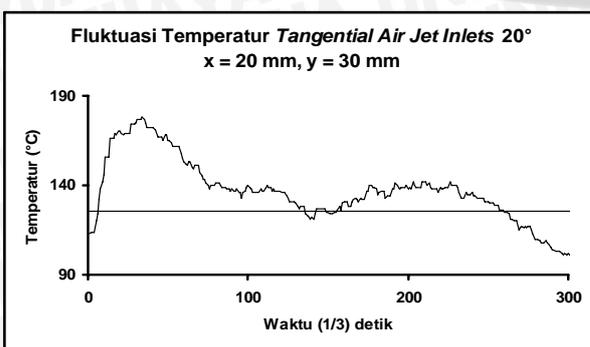
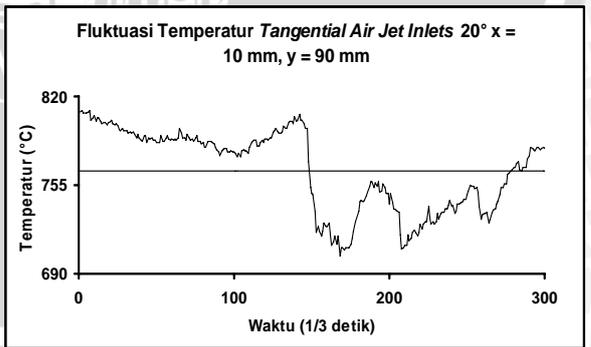
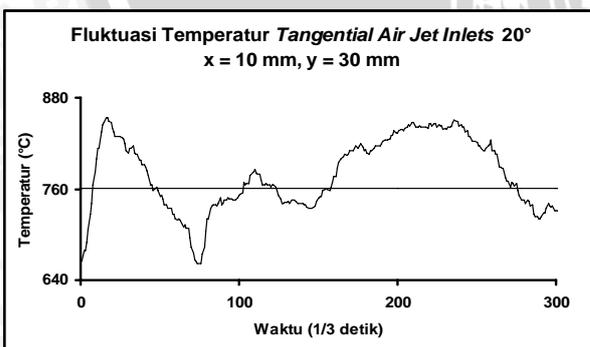
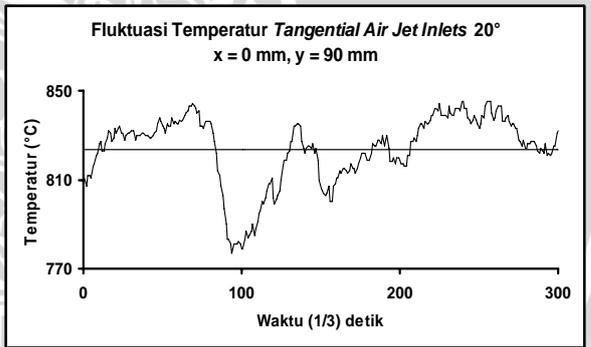
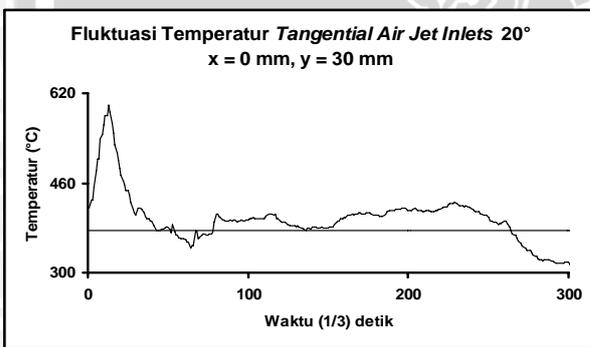
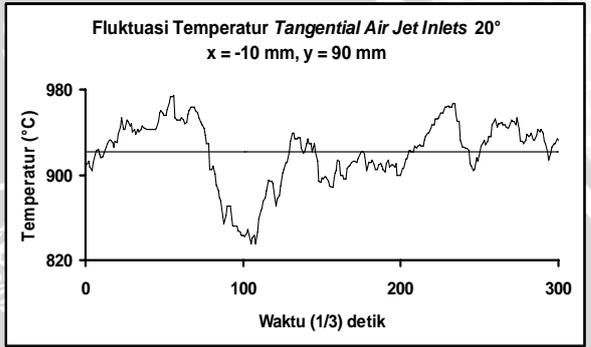
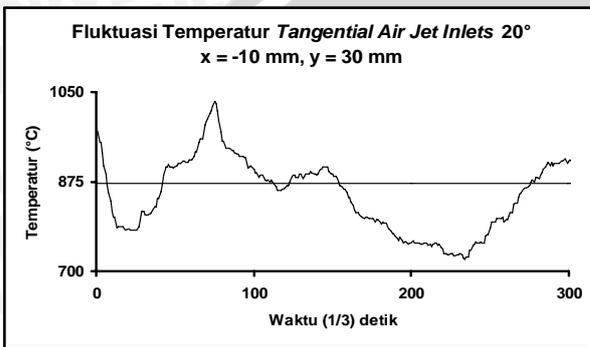
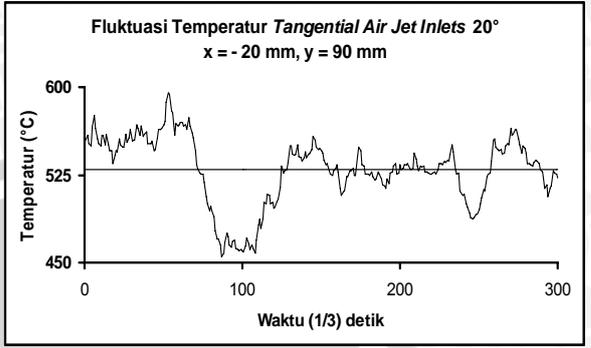
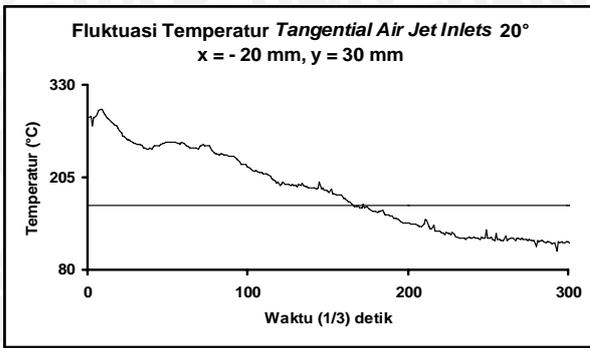
Lampiran 12. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



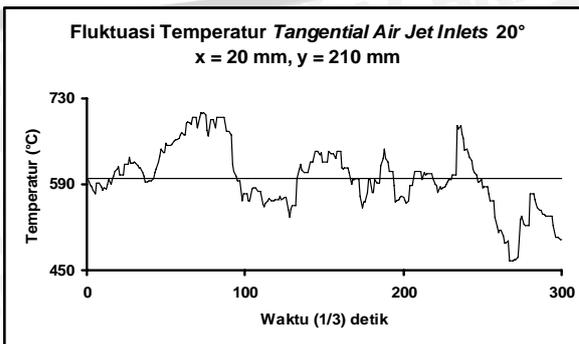
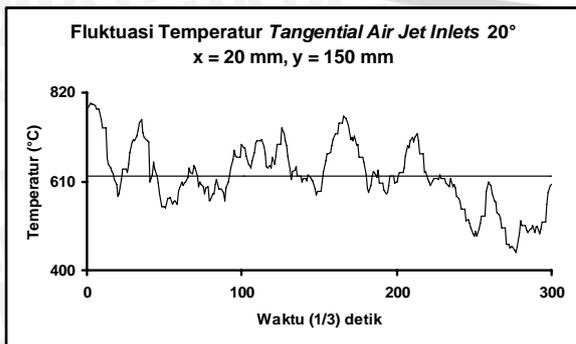
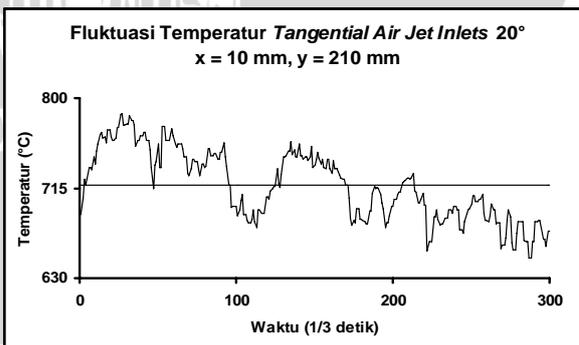
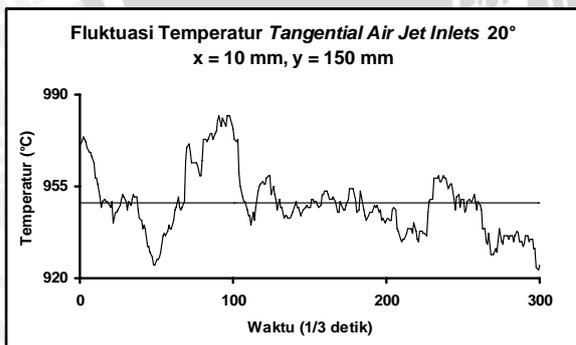
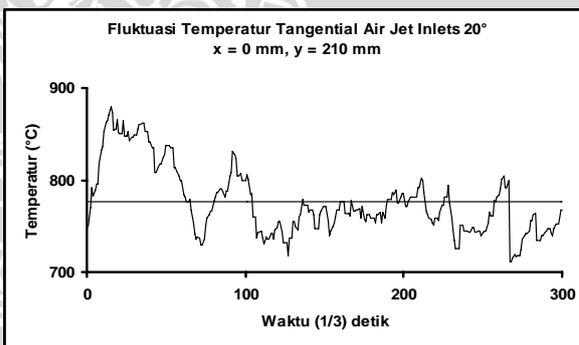
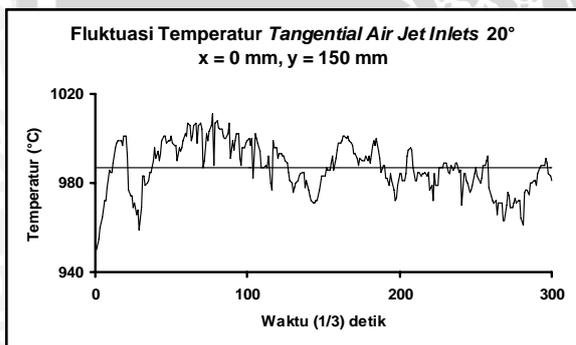
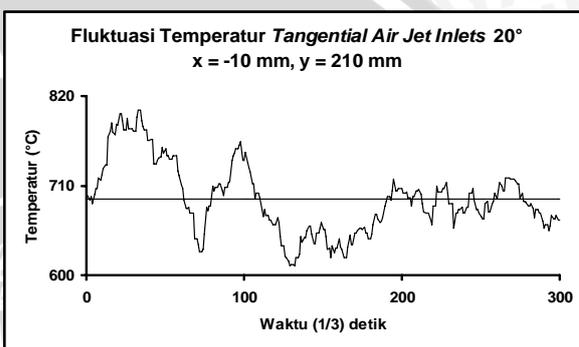
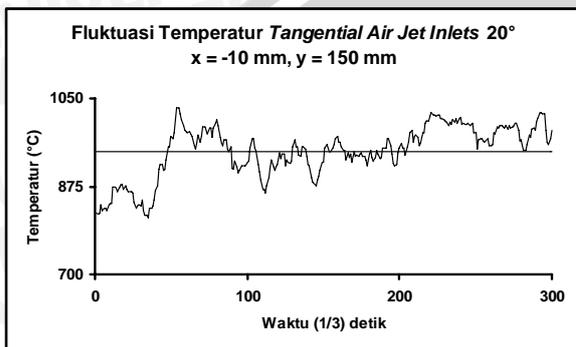
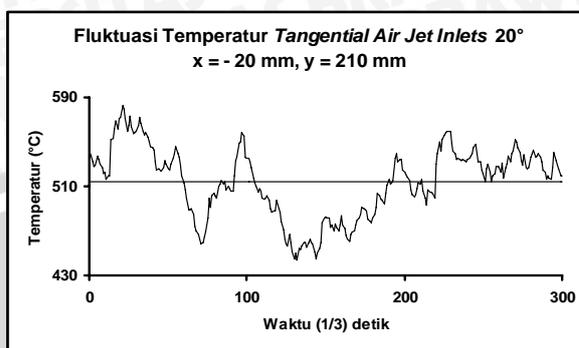
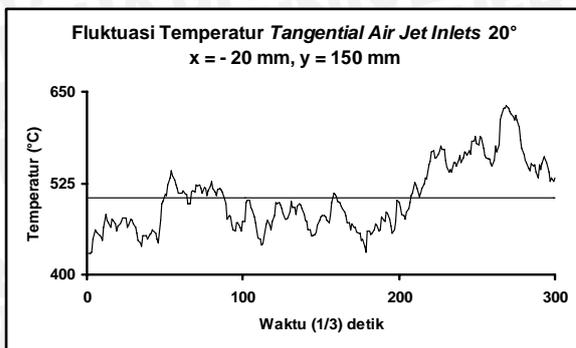
Lampiran 13. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



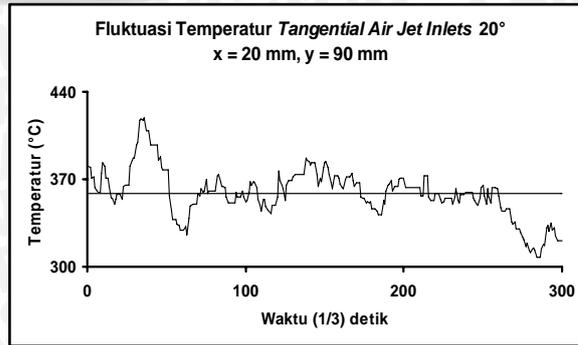
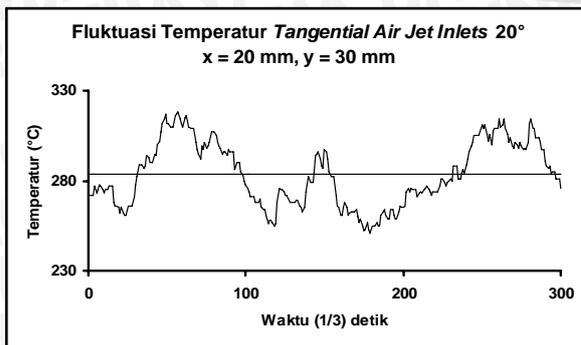
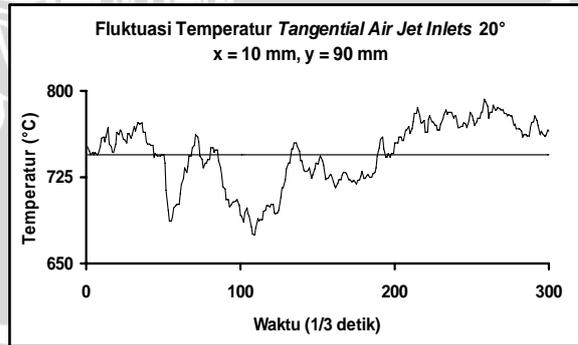
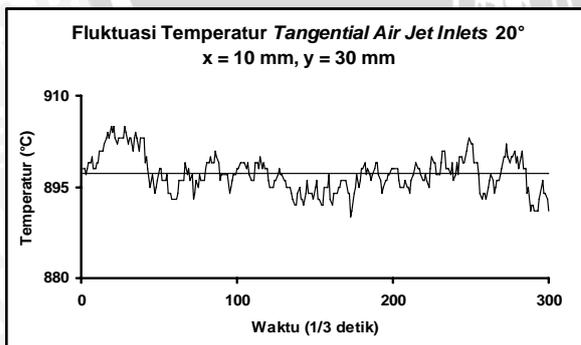
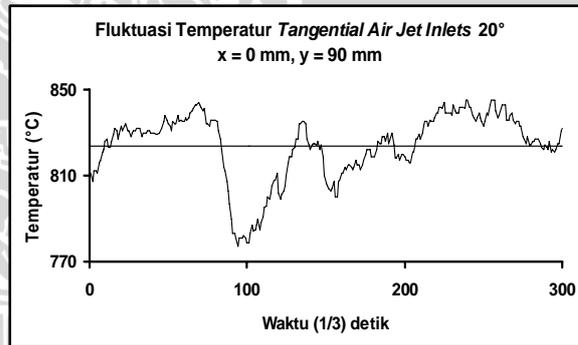
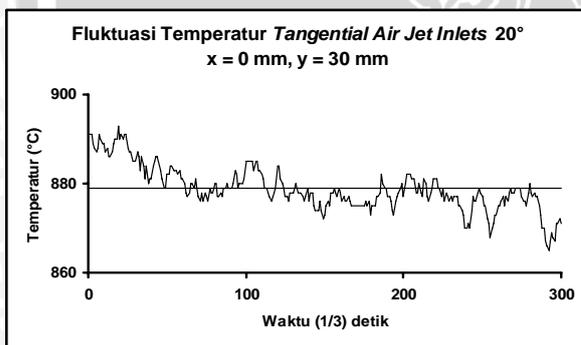
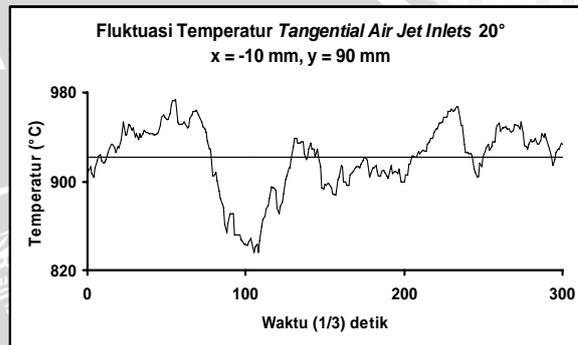
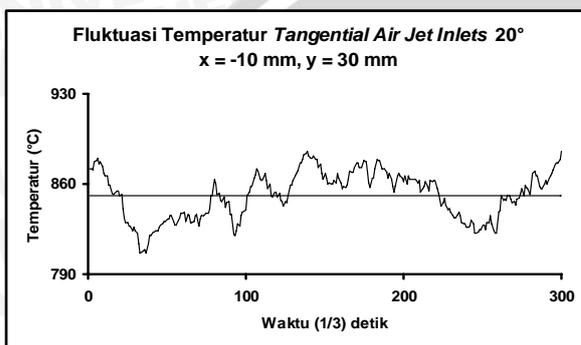
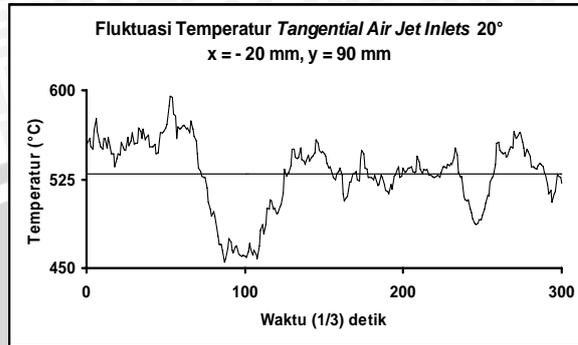
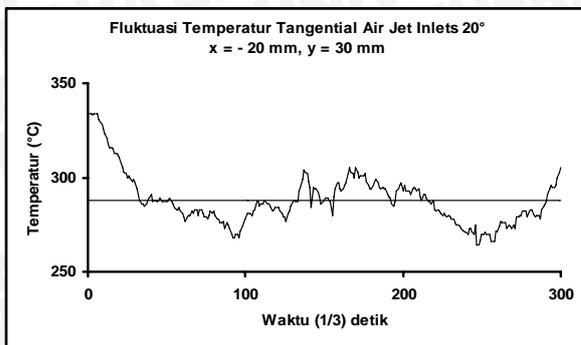
Lampiran 14. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 20° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



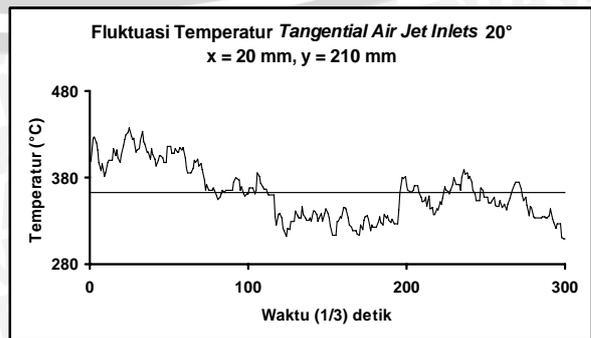
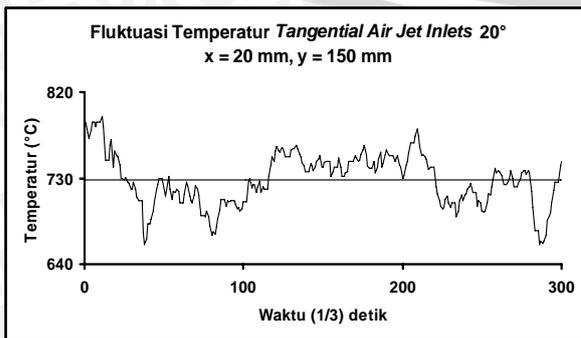
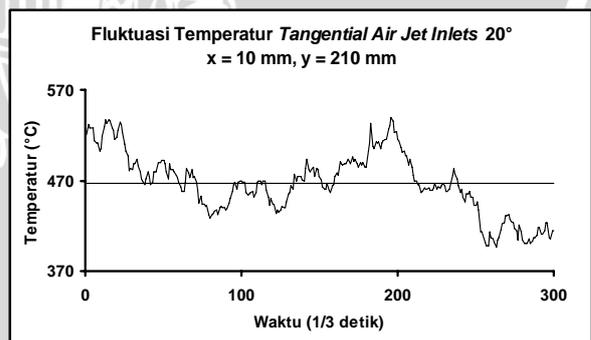
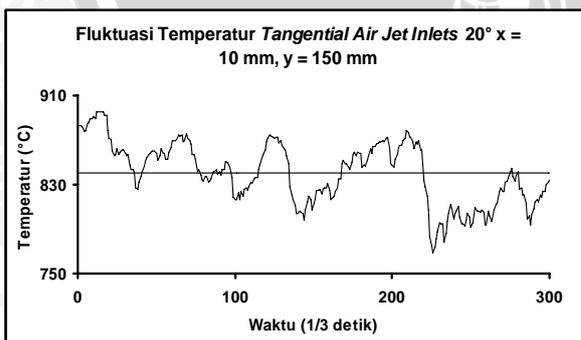
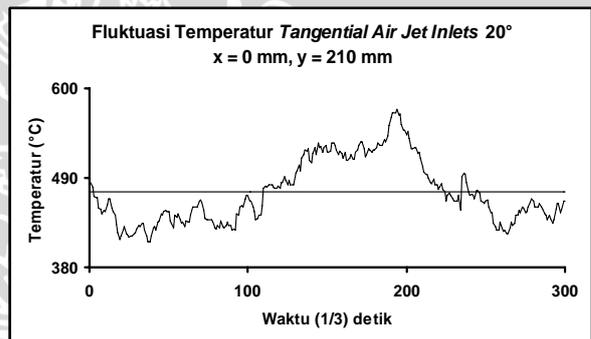
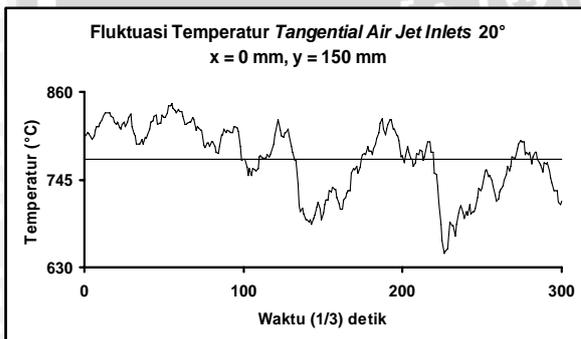
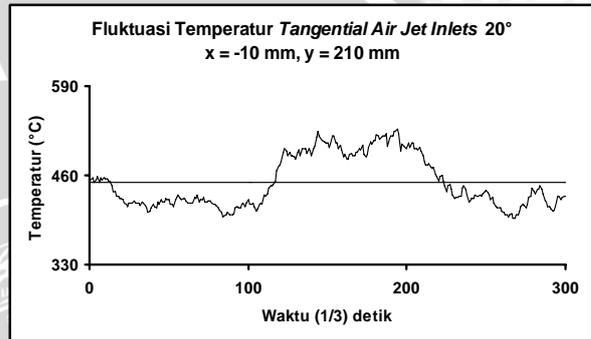
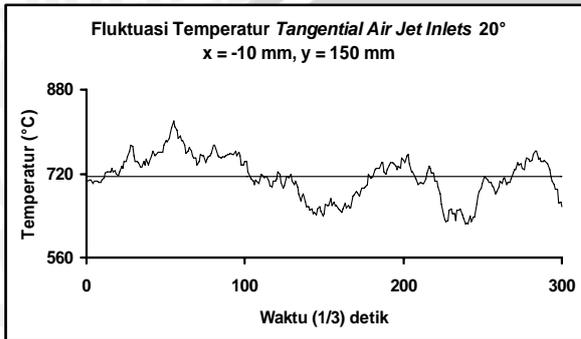
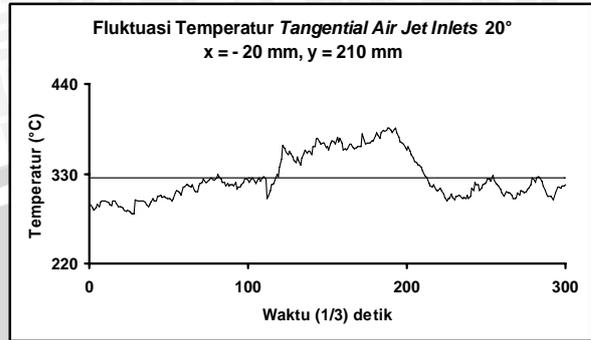
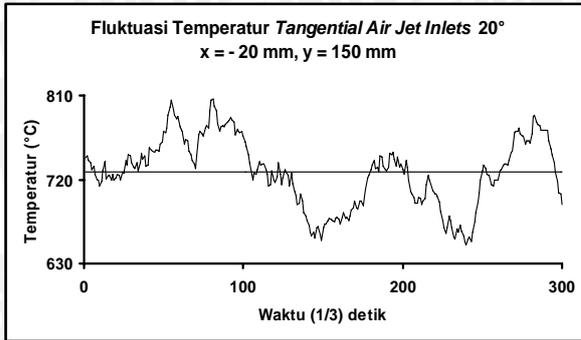
Lampiran 15. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 20° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



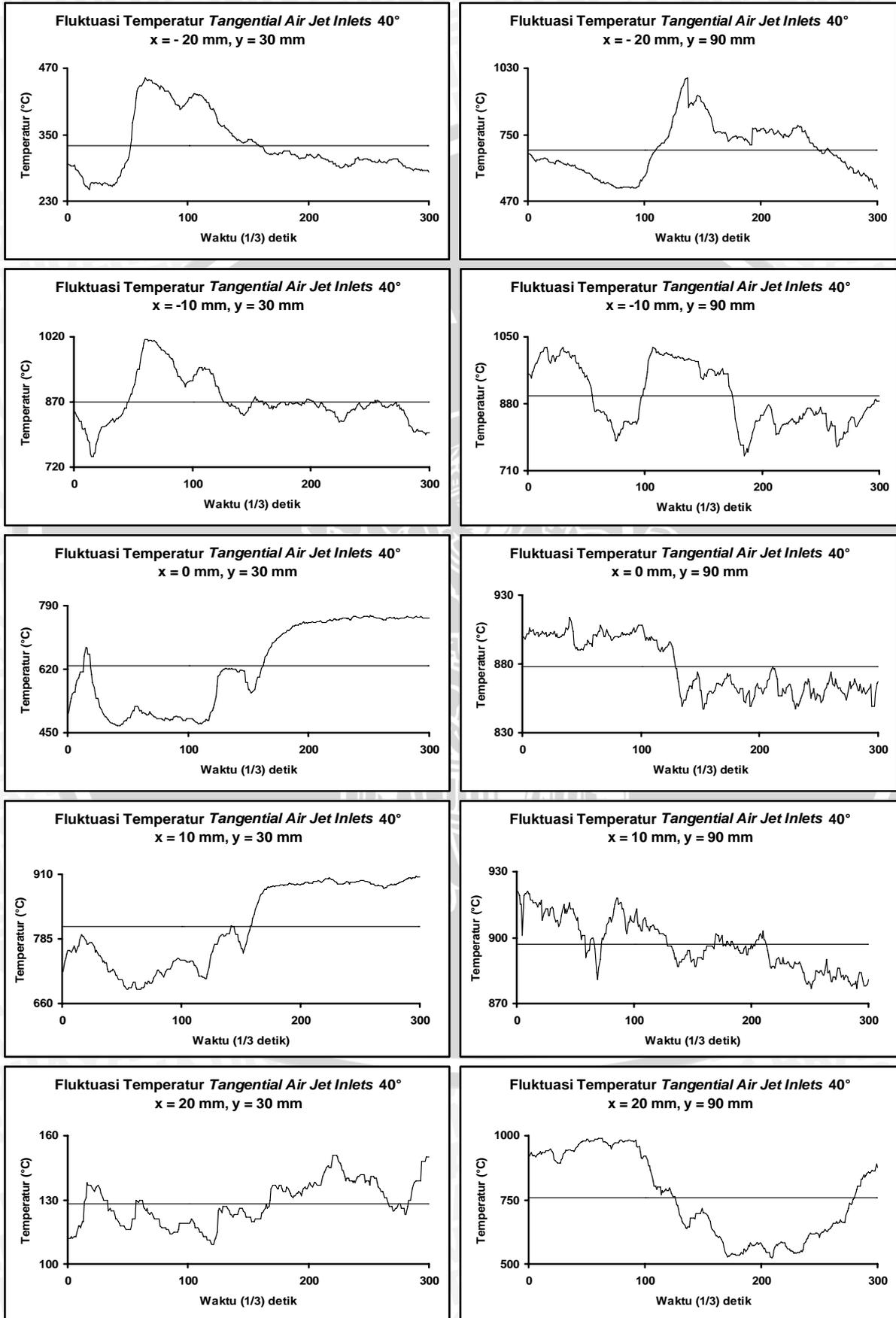
Lampiran 16. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 20° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



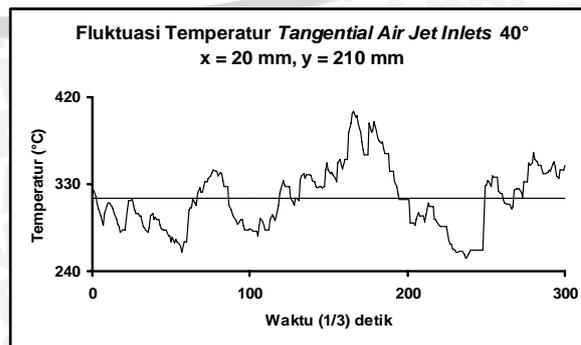
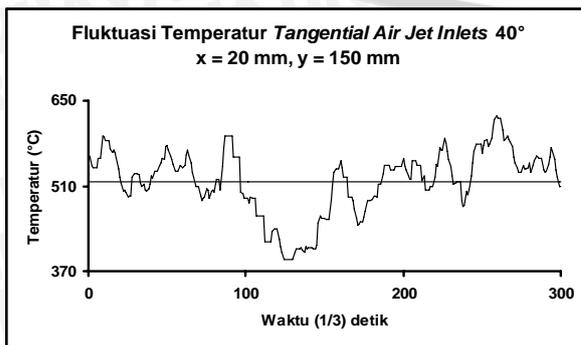
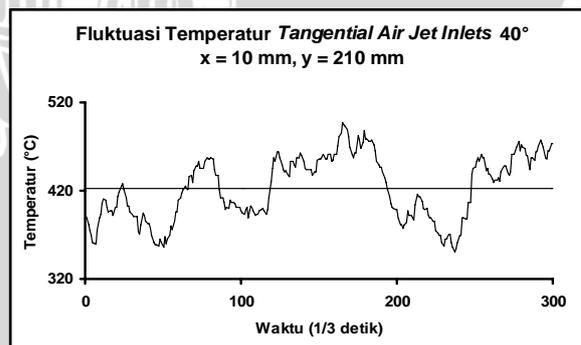
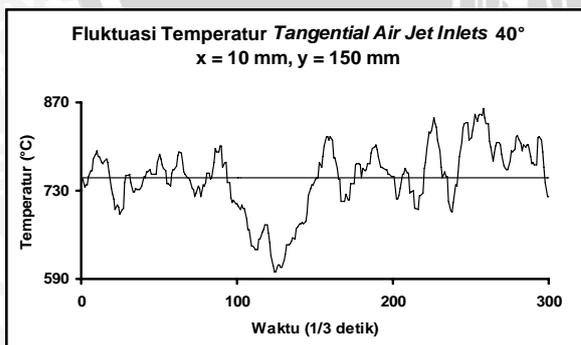
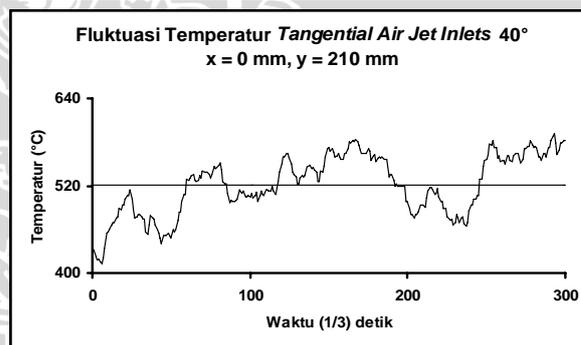
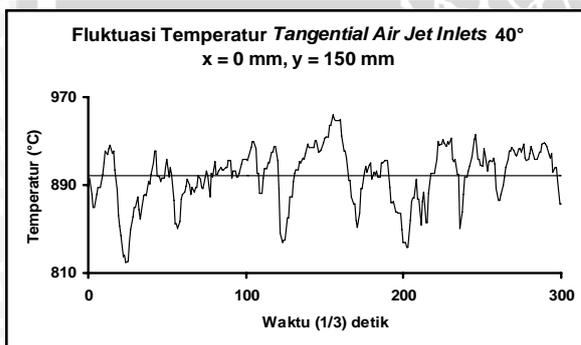
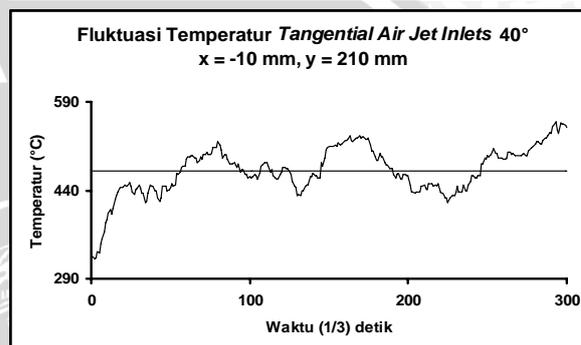
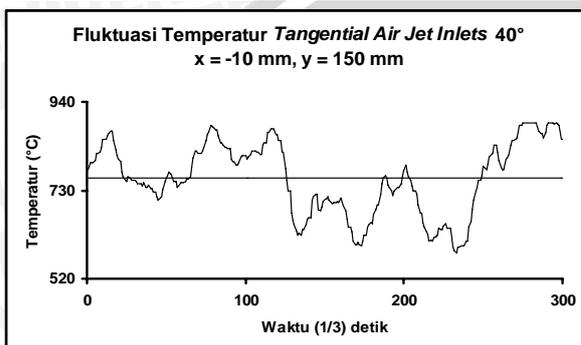
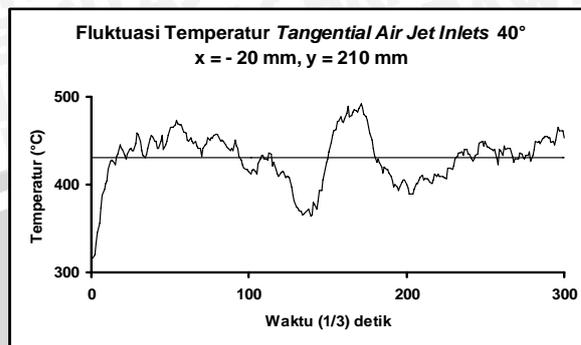
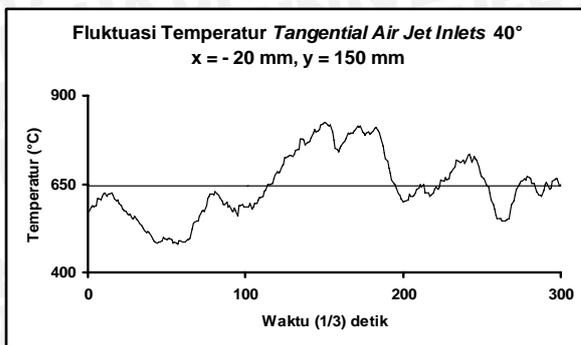
Lampiran 17. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 20° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



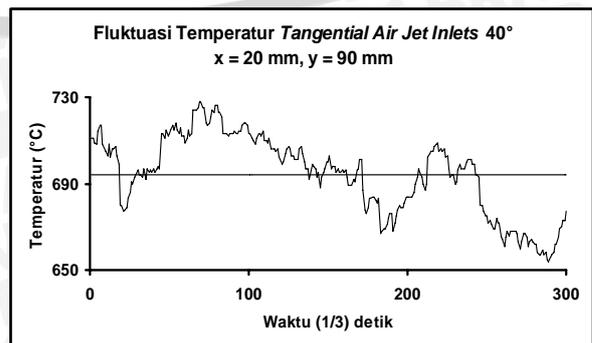
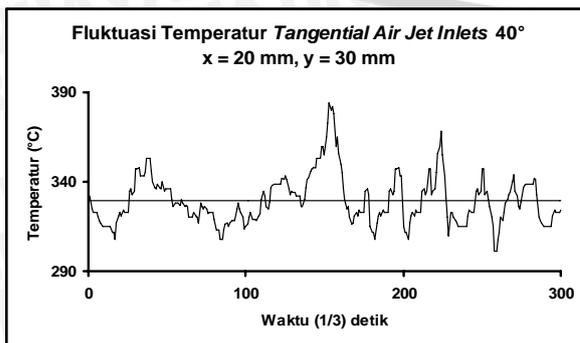
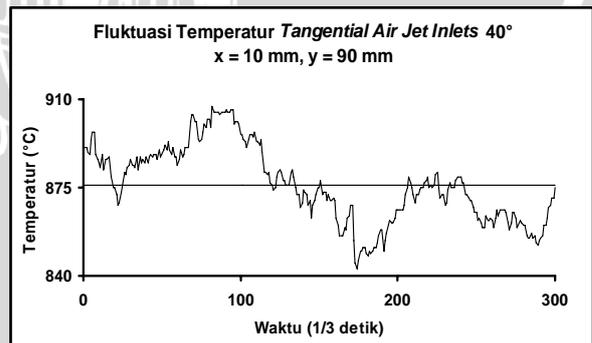
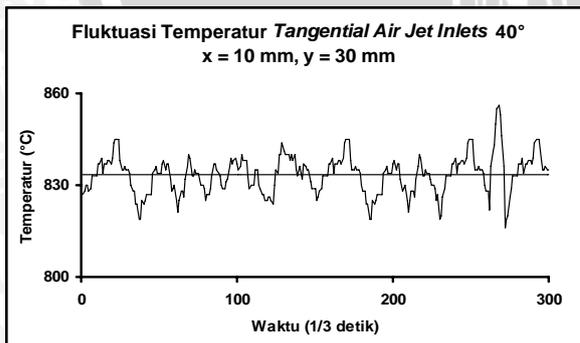
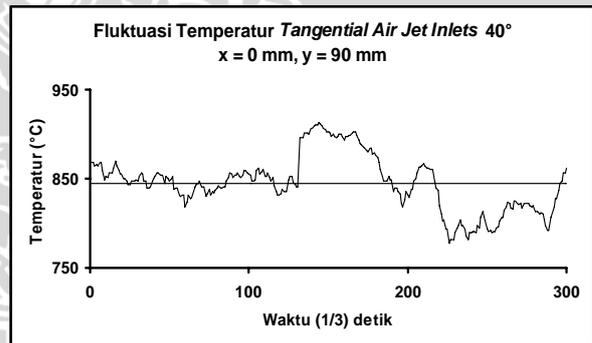
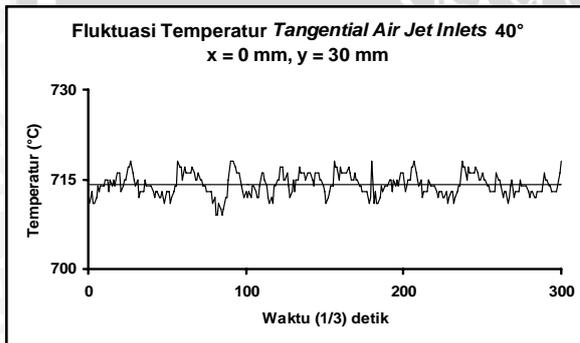
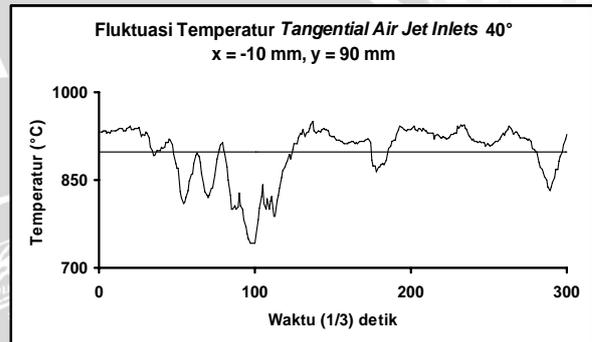
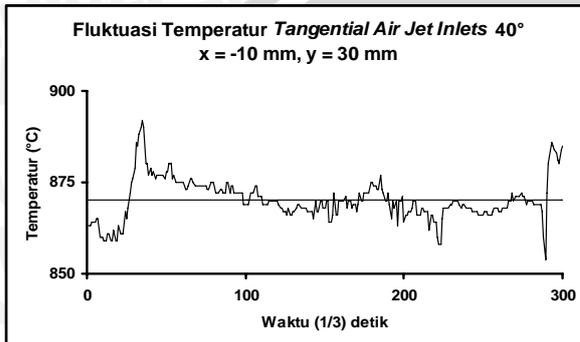
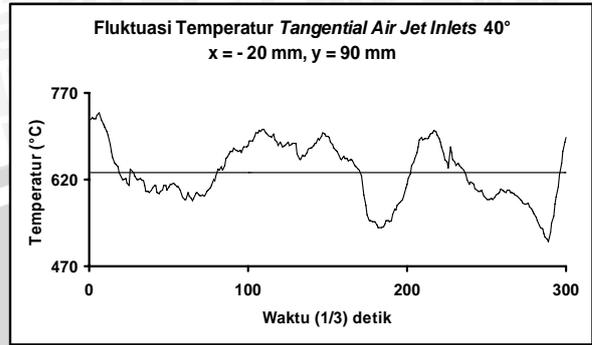
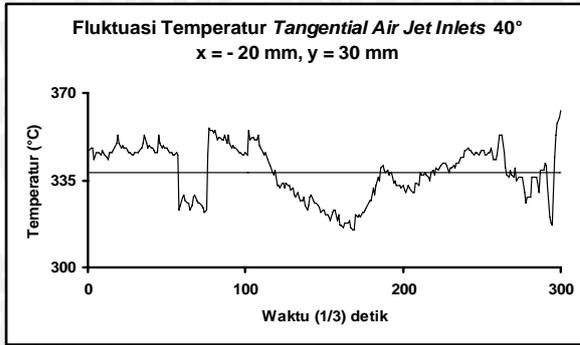
Lampiran 18. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 40° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



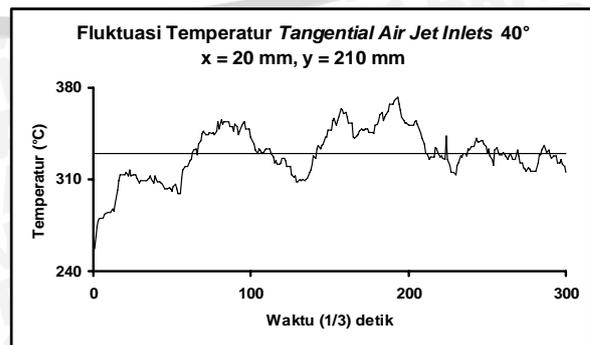
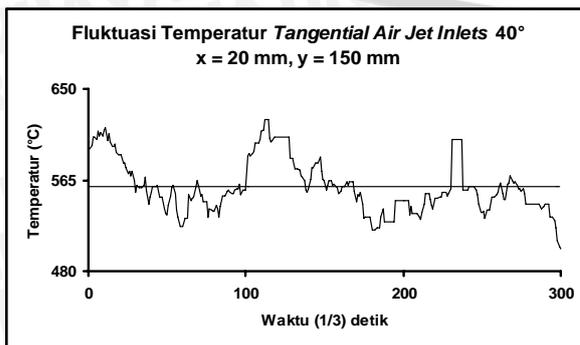
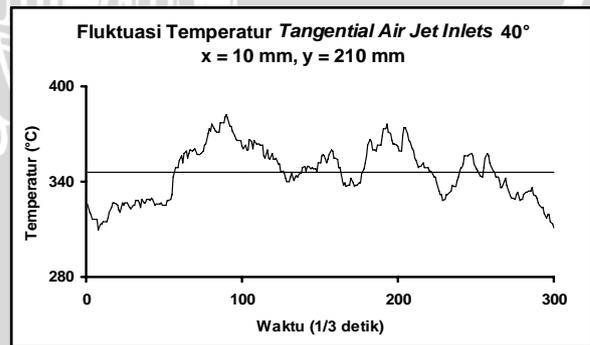
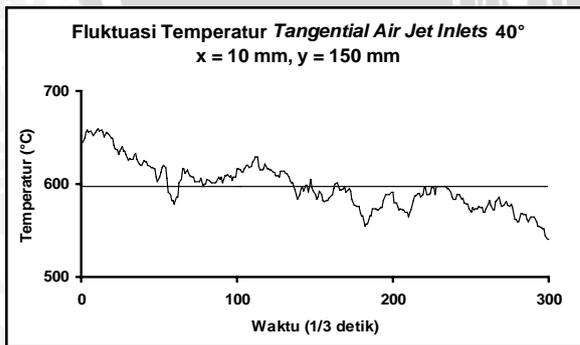
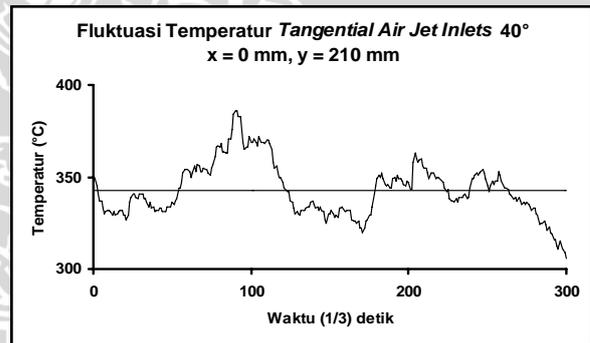
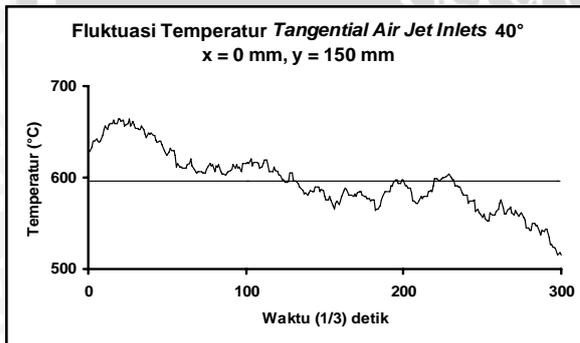
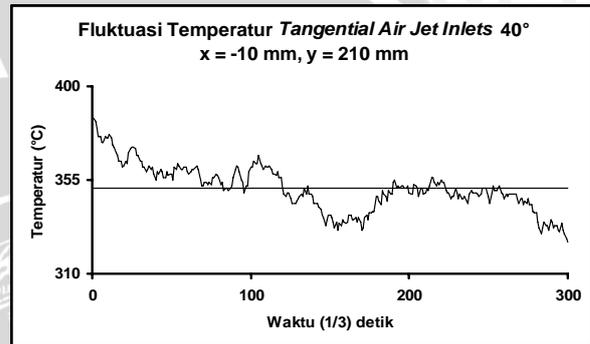
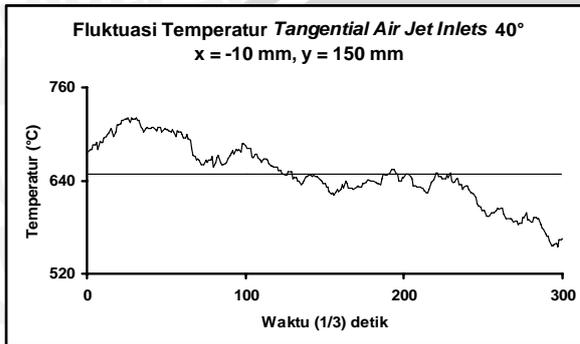
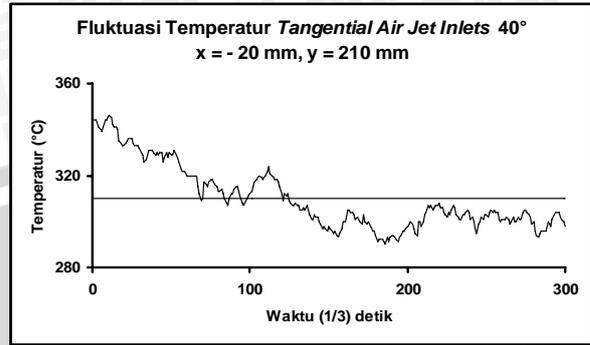
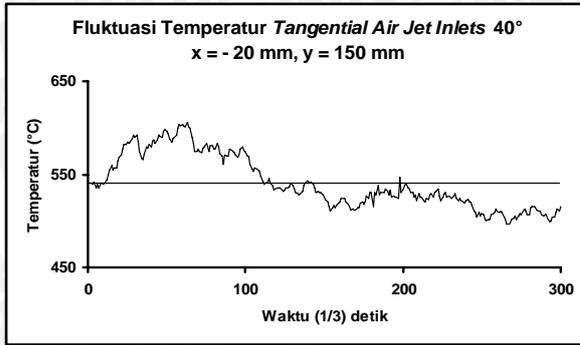
Lampiran 19. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 40° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



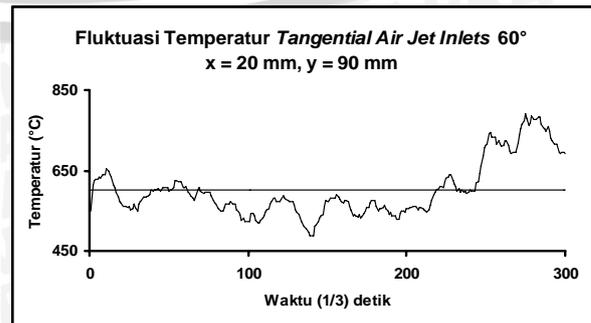
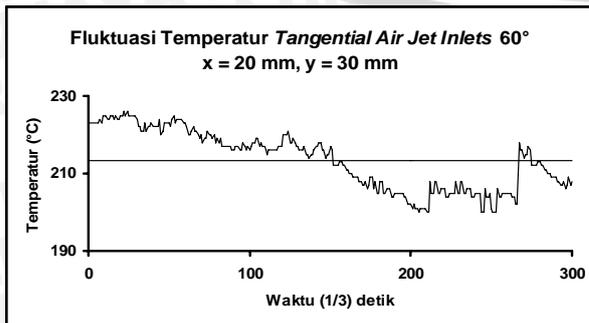
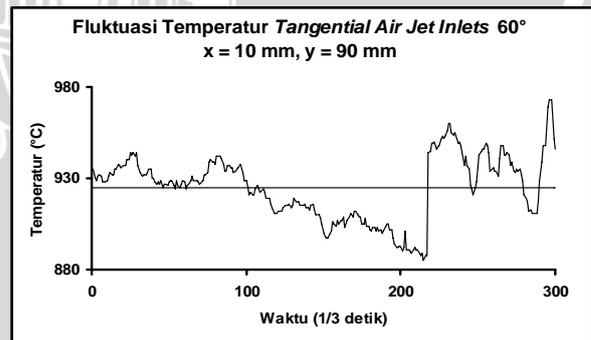
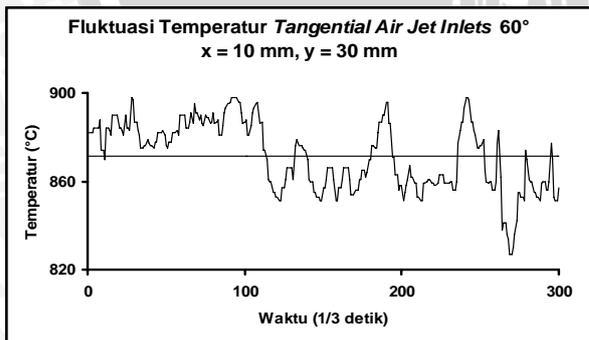
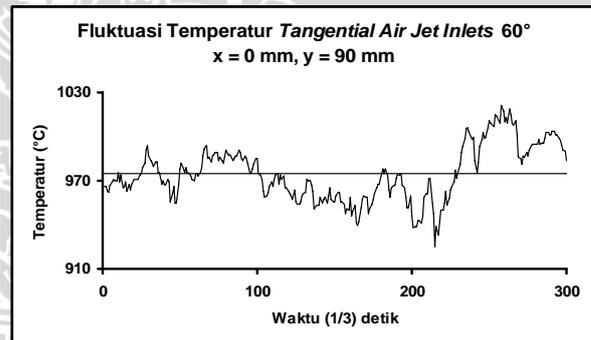
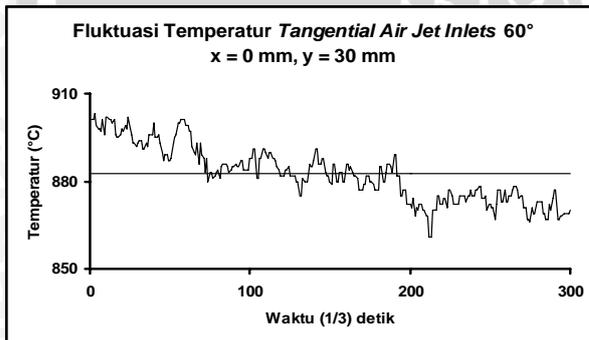
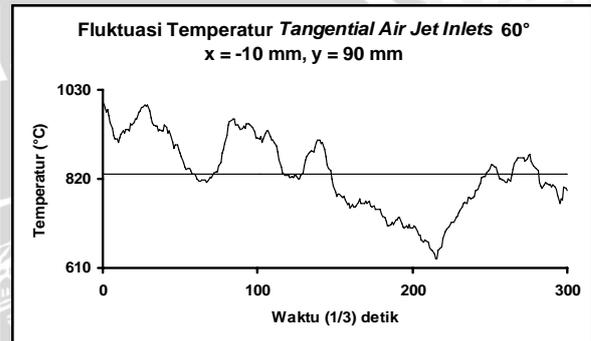
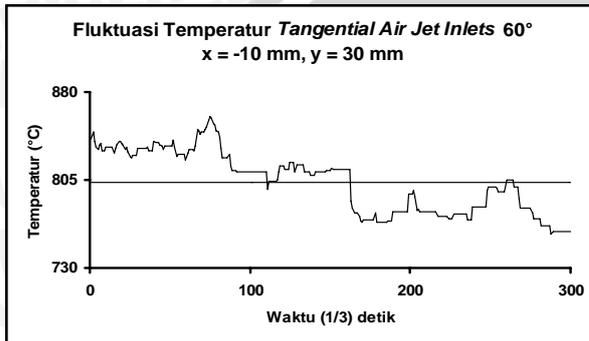
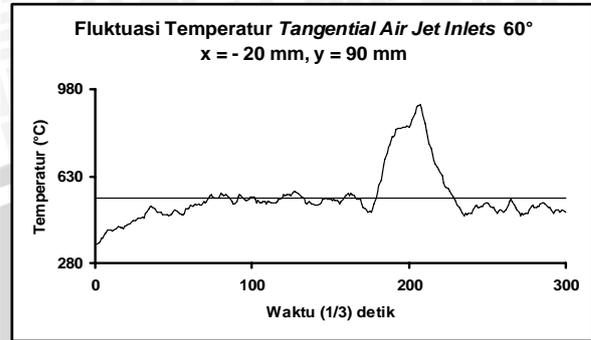
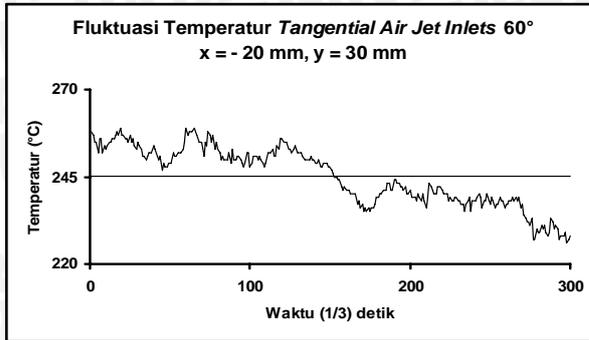
Lampiran 20. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 40° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



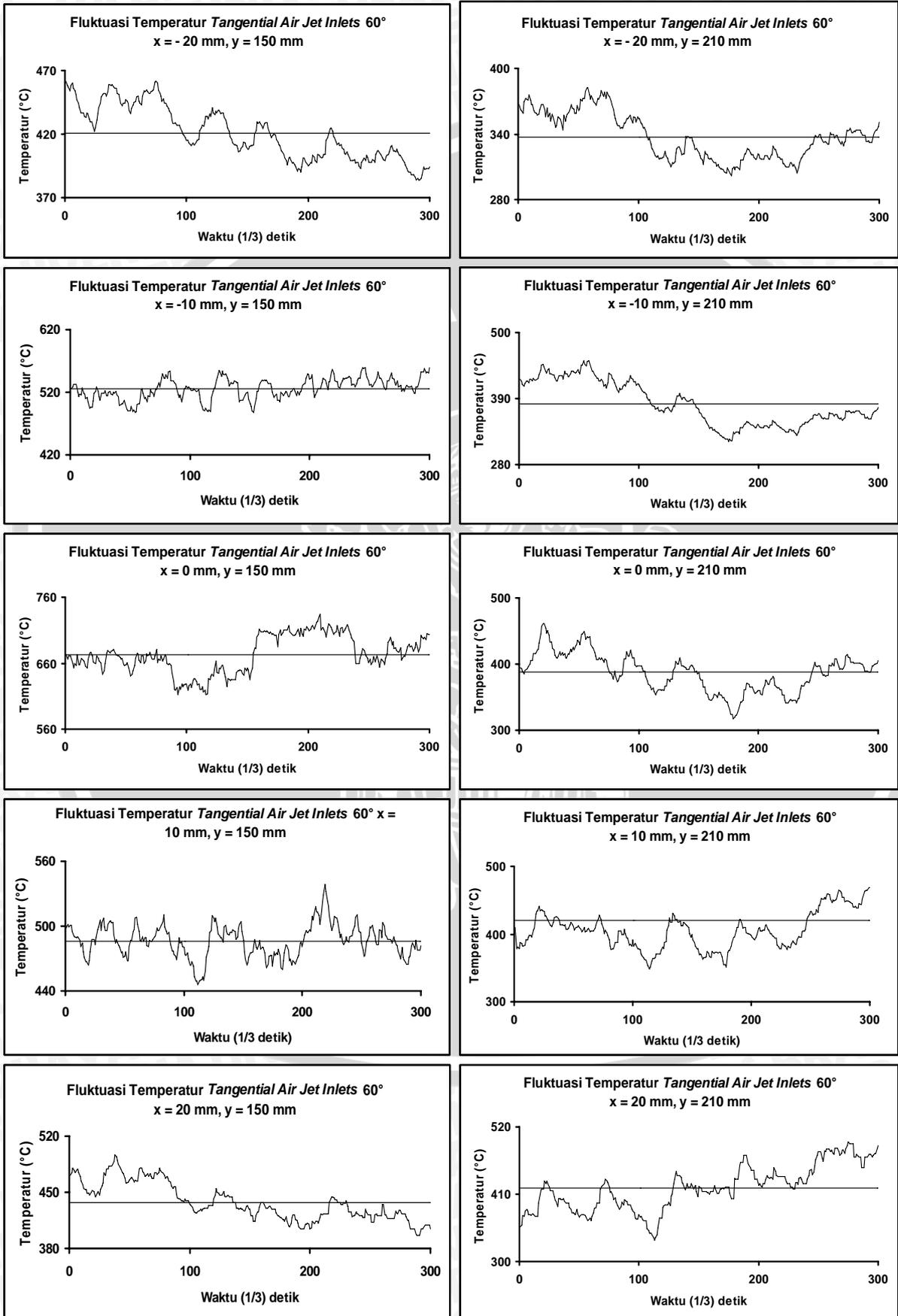
Lampiran 21. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 40° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



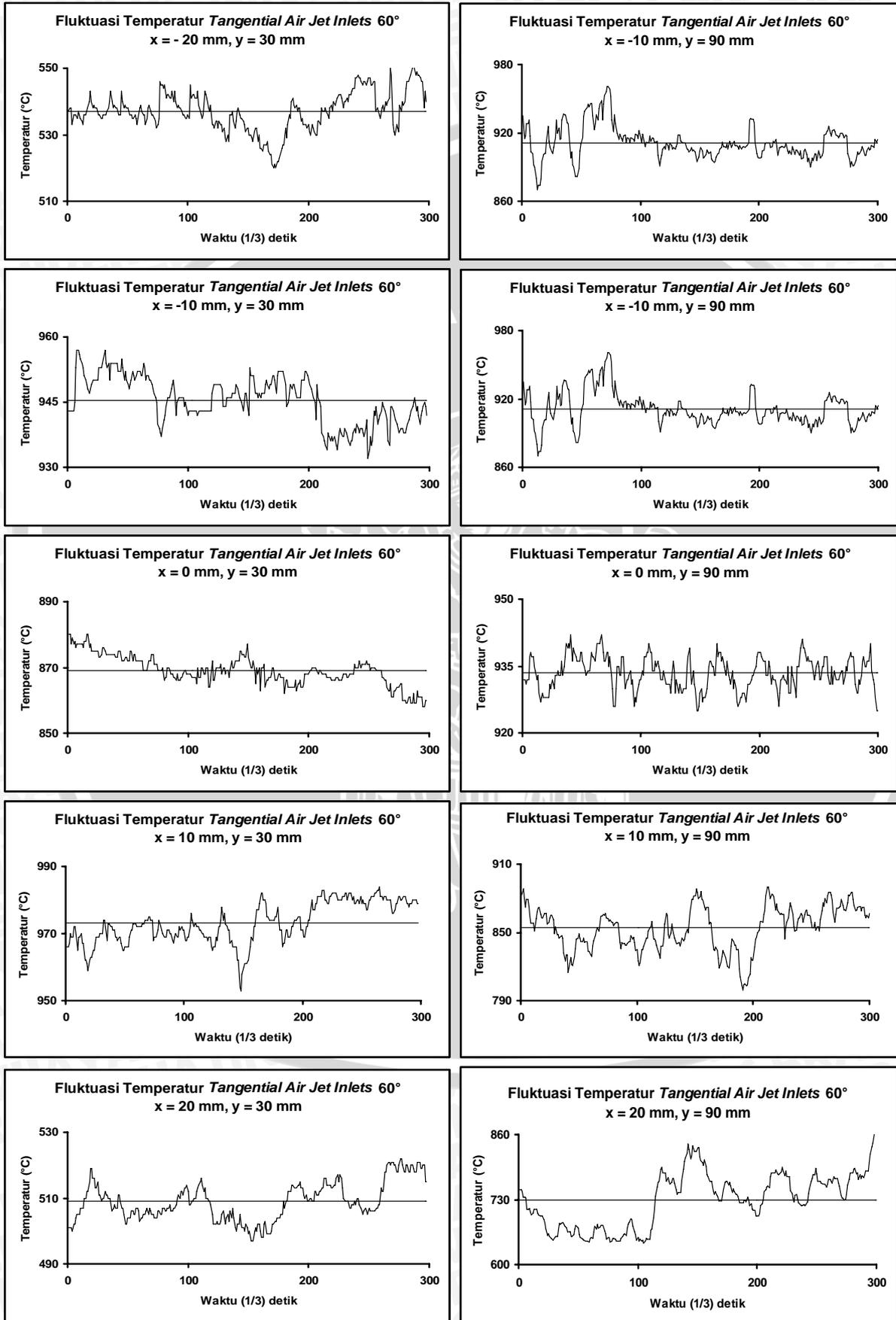
Lampiran 22. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 60° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 23. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 60° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 24. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 60° pada $y = 30$ mm dan $y = 90$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$



Lampiran 25. Fluktuasi temperatur api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 60° pada $y = 150$ mm dan $y = 210$ mm
 $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$, $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$, $W = 12,736 \text{ m.s}^{-1}$

