

**SIMULASI PEMBAKARAN *NON-PREMIXED* DENGAN VARIASI  
KEMIRINGAN *SWIRL BURNER* PADA MODEL TURBULENSI K-**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**RAYVANDI ARDIANSYSAH  
NIM. 125060200111024**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**SIMULASI PEMBAKARAN *NON-PREMIXED* DENGAN VARIASI**  
**KEMIRINGAN *SWIRL BURNER* PADA MODEL TURBULENSI  $K-\epsilon$**

**SKRIPSI**  
**TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RAYVANDI ARDIANSYAH**  
**NIM. 125060200111024**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
Pada tanggal 29 Juli 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.  
NIP. 19750802 199903 2 02

Ir. Agustinus Ariseno, MT.  
NIP. 19510822 198701 1 001

Mengetahui  
Ketua Program Studi

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.  
NIP. 19750802 199903 2 02



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:  
Ayahanda dan Ibunda tercinta.*



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2013, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 29 Juli 2016

Mahasiswa,

Rayvandi Ardiansyah

NIM. 125060207111024

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah, Penguasa semesta alam. Berkat limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya, penulis dapat menyelesaikan naskah skripsi dengan judul “Simulasi Pembakaran Non-Premixed dengan Variasi Kemringan Swirl Burner pada Model turbulensi K- ”. Penulisan skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan dalam jenjang perkuliahan Stata I Universitas Brawijaya. Semoga Dia yang menguasai hidup dan mati, menguasai Langit dan Bumi, berkenan mengampuni kesalahan-kesalahan penulis dan kedzaliman niat penulis sejak dari mempersiapkan, saat menulis hingga naskah skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Demikian juga tidak lupa semoga sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada kekasih pilihan Allah, Muhammad SAW. Semoga rahmat, barakah dan inayah-Nya selalu bergema pada sanak kerabat, sahabat, para tabi'in dan orang-orang yang mengikuti jejak mereka sampai pada hari kiamat. Dari hidup dan kehidupan merekalah kita semua memperoleh pelajaran yang berharga.

Selanjutnya kami ucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada:

1. Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
2. Purnami, ST., MT., Selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya;
3. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya; dan juga selaku dosen pembimbing I skripsi yang telah memberikan bimbingan dan nasihat yang berguna dalam penyusunan skripsi ini;
4. Francisca Gayuh U. D., ST., MT., selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya;
5. Ir. Agustinus Ariseno, MT., selaku dosen pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan dan nasihat yang berguna dalam penyusunan skripsi ini;

6. Bapak Ir. Nurrachmattullah dan ibu Endang Suprihatin selaku orang tua tercinta yang telah memberikan support dengan kasih sayang dan kesabaran yang tiada habisnya hingga saya dapat menyelesaikan studi ini
7. Dhea Fleta Firstqy Raditya Putri selaku wanita yang paling berharga setelah ibu saya yang dengan sabar memberikan support dan motivasi dalam pengerjaan skripsi ini
8. Shiro yang telah mengantar saya dari Malang ke Madiun dan sebaliknya setiap minggu hingga rela hancur demi skripsi ini
9. Teman-teman Admiral dan Begundal 62 yang telah menemani dikala menemui masalah pada saat pengerjaan skripsi ini
10. Seluruh pihak terkait yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semuanya. Demi perbaikan selanjutnya, saran dan kritik yang membangun akan penulis terima dengan senang hati. Sehingga pada akhirnya skripsi ini dapat bermanfaat untuk menambah wawasan bagi kita semua.



Malang, 29 Juli 2016

Penulis,

Rayvandi Ardiansyah

DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>SUMMARY</b> .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	4
2.2 Pembakaran .....	5
2.3 Pembakaran Difusi .....	6
2.4 Kestabilan Api .....	7
2.5 <i>Recirculation</i> .....	8
2.6 <i>Swirling Vanes</i> .....	9
2.7 Visualisasi .....	11
2.8 Transport Fenomena .....	12
2.9 Perpindahan Panas .....	13
2.9.1 Konduksi .....	14
2.9.2 Konveksi .....	15
2.9.3 Radiasi .....	15
2.10 Aliran Turbulen .....	16
2.10.1 Bilangan Reynold .....	16
2.10.2 Transisi Laminar Turbulen .....	17



2.11	Efek Konservasi Massa dan Energi Terhadap Aliran .....	19
2.12	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD).....	21
2.13	Pemodelan Aliran Turbulen.....	22
2.13.1	K-epsilon Model .....	22
2.13.2	<i>Large Eddy Simulation</i> (LES) .....	23
2.13.3	K-omega model .....	23
2.14	Pembakaran Gas .....	24
2.14.1	Pembakaran Gas Metana (CH <sub>4</sub> ).....	25
2.15	Perbandingan Udara dan Bahan Bakar.....	26
2.15.1	Ekuivalen Ratio .....	27
2.16	PDF( <i>Probability Density Function</i> ) .....	27
2.17	Persamaan Energi .....	28
2.18	Hipotesis .....	29

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN** .....

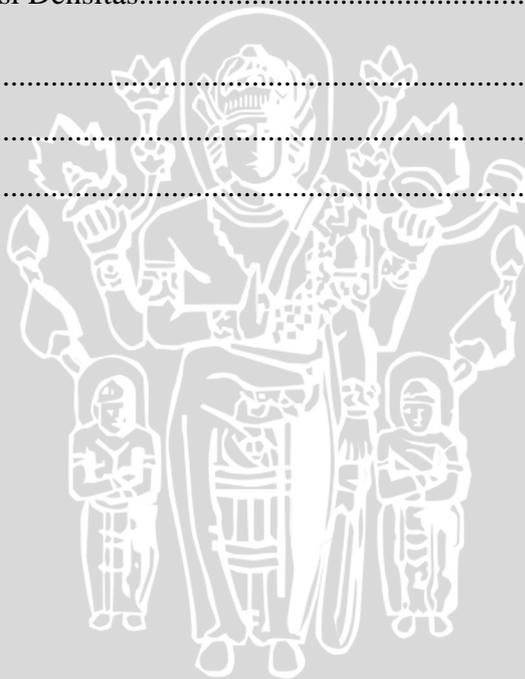
3.1	Metodologi Penelitian .....	30
3.2	Tempat dan Waktu Simulasi .....	30
3.3	Variabel Penelitian .....	30
3.3.1	Variabel Bebas .....	30
3.3.2	Variabel Terikat .....	30
3.3.3	Variabel Terkontrol.....	31
3.4	Spesifikasi Komputer .....	31
3.5	Langkah – Langkah Simulasi .....	31
3.5.1	Preprocessing .....	31
3.5.1.1	Penentuan Geometri Swirl.....	31
3.5.1.2	Menentukan Geometri .....	32
3.5.1.3	<i>Meshing</i> .....	32
3.5.2	Processing .....	33
3.5.2.1	Persamaan Atur .....	33
3.5.2.2	Kondisi Awal (Initial Condition).....	33
3.5.3	Postprocessing .....	34
3.6	Diagram Alir Penelitian.....	36



<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	37
4.1 <i>Validasi</i> Eksperimen.....	37
4.2 Pembahasan.....	39
4.2.1 Distribusi Temperatur.....	39
4.2.1.1 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi <i>Swirl</i> .....	39
4.2.1.2 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi Kecepatan Bahan Bakar.....	41
4.2.1.3 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi Kecepatan Udara.....	46
4.2.2 Distribusi Kecepatan.....	51
4.2.3 Distribusi Densitas.....	52
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Sifat-sifat Bahan Bakar Gas .....	24
Tabel 2.2 Properti Kimia Metana .....	26



## DAFTAR GAMBAR

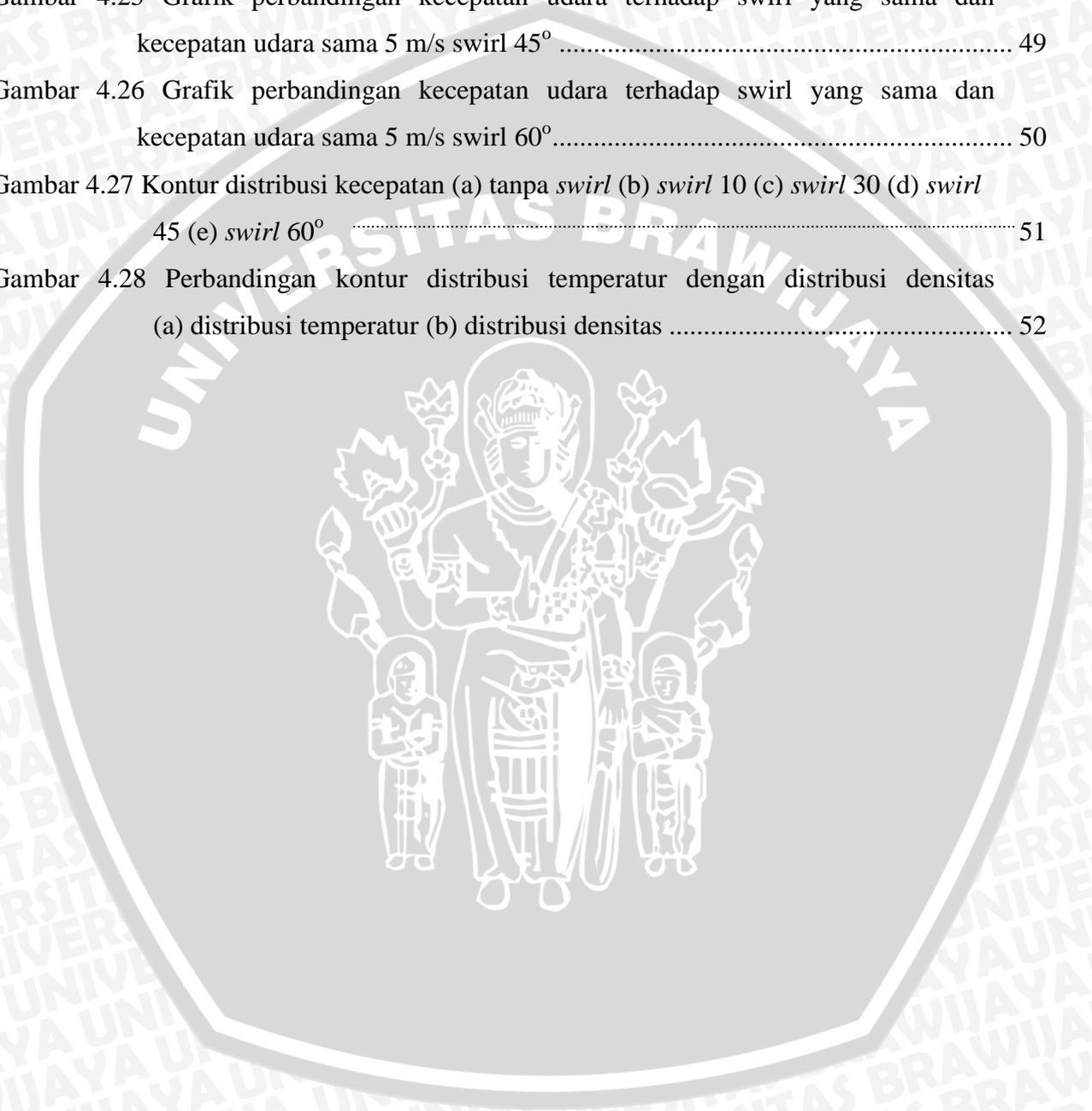
Gambar 2.1 Ilustrasi proses pembakaran.....	5
Gambar 2.2 : Perubahan tinggi api dengan penambahan kecepatan aliran .....	7
Gambar 2.3 : Zona <i>Resirkulasi</i> dan Daerah Pancaran Api .....	8
Gambar 2.4 : <i>Swirl Vanes</i> .....	9
Gambar 2.5 : Aliran <i>Resirkulasi</i> yang disebabkan oleh Pusaran Kuat .....	10
Gambar 2.6 : Campuran Bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada Api Difus .....	11
Gambar 2.7 : Aliran Turbulen .....	16
Gambar 2.8 : Pola aliran <i>unsteady</i> kecepatan aliran terhadap waktu .....	17
Gambar 2.9 : Grafik profil kecepatan (a) transisi turbulen (b) laminar.....	18
Gambar 2.10 : Aliran Transisi .....	18
Gambar 2.11 : Struktur Kimia Metana .....	25
Gambar 3.1 Desain <i>Swirl Burner</i> .....	31
Gambar 3.2 Asumsi 2D .....	32
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> .....	32
Gambar 3.4 Initial Condition.....	33
Gambar 3.5 visualisasi distribusi temperatur .....	34
Gambar 3.6 Visualisasi distribusi tekanan .....	34
Gambar 3.7 Visualisasi distribusi kecepatan .....	35
Gambar 4.1 Perbandingan visualisasi api dan distribusi temperatur (a) visualisasi api eksperimen nyata (b) visualisasi distribusi temperatur simulasi.....	37
Gambar 4.2 Perbandingan distribusi kecepatan pada eksperimen nyata (a) foto <i>schlieren</i> (b) kontur distribusi kecepatan .....	38
Gambar 4.3 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi <i>swirl</i> dan variasi kecepatan bahan bakar 3 m/s dan kecepatan udara 5 m/s .....	39
Gambar 4.4 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi <i>swirl</i> dan variasi kecepatan bahan bakar 5 m/s. dan kecepatan udara 5 m/s .....	39
Gambar 4.5 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi <i>swirl</i> dan variasi kecepatan bahan bakar 7m/s. dan kecepatan udara 5 m/s .....	40
Gambar 4.6 Kontur distribusi temperatur pada variasi <i>swirl</i> dan kecepatan bahan bakar (a) 3 m/s (b) 5 m/s (c) 7m/s. dan kecepatan udara 5 m/s.....	41



Gambar 4.7 (a) tanpa <i>swirl</i> kecepatan udara 3 m/s (b) tanpa <i>swirl</i> kecepatan udara 5m/s (c) tanpa <i>swirl</i> ° kecepatan udara 7 m/s .....	41
Gambar 4.8 (a) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 7 m/s .....	42
Gambar 4.9 (a) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 7 m/s .....	42
Gambar 4.10 (a) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 7 m/s .....	42
Gambar 4.11 (a) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 7 m/s .....	43
Gambar 4.12 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s tanpa <i>swirl</i> .....	43
Gambar 4.13 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s <i>swirl</i> 10° .....	44
Gambar 4.14 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s <i>swirl</i> 30° .....	44
Gambar 4.15 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s) <i>swirl</i> 45° .....	45
Gambar 4.16 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s <i>swirl</i> 60° .....	45
Gambar 4.17 (a) tanpa <i>swirl</i> kecepatan udara 3 m/s (b) tanpa <i>swirl</i> kecepatan udara 5m/s (c) tanpa <i>swirl</i> ° kecepatan udara 7 m/s .....	46
Gambar 4.18 (a) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 10° kecepatan udara 7 m/s .....	46
Gambar 4.19 (a) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 30° kecepatan udara 7 m/s .....	47
Gambar 4.20 (a) <i>swirl</i> 45° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 45° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 45° kecepatan udara 7 m/s .....	47
Gambar 4.21 (a) <i>swirl</i> 60° kecepatan udara 3 m/s (b) <i>swirl</i> 60° kecepatan udara 5 m/s (c) <i>swirl</i> 60° kecepatan udara 7 m/s .....	47
Gambar 4.22 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap <i>swirl</i> yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s (a) tanpa <i>swirl</i> .....	48



Gambar 4.23 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 10° .....	48
Gambar 4.24 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 30° .....	49
Gambar 4.25 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 45° .....	49
Gambar 4.26 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 60° .....	50
Gambar 4.27 Kontur distribusi kecepatan (a) tanpa swirl (b) swirl 10 (c) swirl 30 (d) swirl 45 (e) swirl 60° .....	51
Gambar 4.28 Perbandingan kontur distribusi temperatur dengan distribusi densitas (a) distribusi temperatur (b) distribusi densitas .....	52



## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Desain *Swirl 10*

LAMPIRAN 2 Desain *Swirl 30*

LAMPIRAN 3 Desain *Swirl 45*

LAMPIRAN 4 Desain *Swirl 60*

LAMPIRAN 5 Hasil Visualisasi Simulasi

LAMPIRAN 6 Data Hasil Simulasi



## RINGKASAN

Pembakaran merupakan bagian terpenting dalam kehidupan manusia, terutama pada dunia teknik dan industri, yang mana memerlukan bahan bakar untuk melakukan proses produksi. Hampir semua industri menggunakan proses pembakaran, antara lain : Pembangkit listrik, industri logam, industri kimia, industri bahan mentah, dan lain sebagainya. Industri merupakan konsumen bahan bakar yang paling besar. Jika terus dibiarkan dikhawatirkan bahan bakar fosil lama kelamaan akan habis dan tidak diragukan lagi bahan bakar fosil akan menjadi langka dimasa mendatang. Karena hal tersebut kita penelitian tentang pembakaran guna menciptakan pembakaran yang lebih efisien, untuk menanggulangi pemborosan penggunaan bahan bakar. Selain itu penggunaan ruang bakar sebagai tempat pembakaran juga harus diperhatikan untuk kondisinya. Karena bentuk dari ruang bakar ini mempengaruhi hasil dari pembakaran,

Penelitian kali ini menggunakan penelitian semu. Hal yang melatar belakangi dalam menggunakan ekperimental semu dikarenakan ekperimental semumemiliki keuntungan dalam pengambilan data. Dan dengan menggunakan ekperimental semu ini kita juga dapat mengetahui fenomena- fenomena yang terjadi pada penelitian kami yang lebih detail dengan cara pendekatan *numeric*. penelitian ini dilakukan dengan pendekatan (simulasi) dari pembakaran difusi dengan menggunakan bahan bakar methane ( $\text{CH}_4$ ) dan udara dengan kandungan 29% Oksigen ( $\text{O}_2$ ), 71% nitrogen ( $\text{N}_2$ ) serta penambahan *swirl* pada saluran udara. Kami menggunakan permodelan turbulensi k- $\epsilon$ . Simulasi ini menggunakan variasi dari bahan bakar dengan kecepatan bahan bakar 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s dimana kecepatan udara 5 m/s dan variasi kecepatan udara dengan kecepatan aliran udara 3 m/s, 5 m/s, 7m/s dimana kecepatan bahan bakarnya konstan yaitu 5 m/s. Pada simulasi ini kami menggunakan tekanan ruang 1 atm. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa semakin besar sudut kemiringan dari *swirl burner* menyebabkan api semakin pendek. Suhu tertinggi didapatkan pada pemasangan *swirl*  $45^\circ$  dan yang paling rendah adalah  $60^\circ$ . Didapatkan pula dimana semakin tinggi kecepatan udara maka tinggi api akan semakin memendek tetapi suhu api akan semakin tinggi. Dan pada variasi kecepatan bahan bakar kita dapatkan hasil bahwa semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka api akan semakin tinggi tetapi suhu api akan semakin menurun

**Kata Kunci:** Pembakaran, Swirl Burner, Simulasi, Non-Premixed, K- $\epsilon$  model

## SUMMARY

Combustion is an important part of human life, especially in the world of engineering and industry, which requires fuel to make the production process. Almost all industries use the combustion process, among other things: power generation, metal industry, chemical industry, industrial raw materials, and so forth. Industrial consumer of fuel at most. If left unchecked feared fossil fuels over time will run out and no doubt the fossil fuel will become scarce in the future. Because it is our research on combustion in order to create a more efficient combustion, to overcome pemborosan fuels use. Besides the use of the combustion chamber as the combustion should also be considered for the condition. Because of the shape of the combustion chamber affects the outcome of pembakran, because the combustion chamber can affect how the air and fuel mix. Besides the combustion chamber also serves as a place to regulate the composition of the fuel and air.

The present study uses pseudo research. Things background in using experimental quasi-experimental because semumemiliki advantage in data retrieval. And by using this quasi-experimental we can also know the phenomena that occur in our study that in more detail by way of numerical approach. This research is done with the approach (simulation) of burning fuel diffusion using methane ( $\text{CH}_4$ ) and air containing 29% oxygen ( $\text{O}_2$ ), 71% nitrogen ( $\text{N}_2$ ) and the addition of swirl on the airways. We use k- turbulence modeling. This simulation uses a variation of the fuel at the speed of fuel 3 m / s, 5 m / s, 7 m / s where air velocity 5 m / s and a variable speed air with air flow velocity of 3 m / s, 5 m / s, 7m / s speed which fuel is constant at 5 m / s. In this simulation we used the chamber pressure 1 atm. From the results of this study found that the greater the tilt angle of the swirl burner caused the fire is getting shorter. The highest temperature obtained at 45° swirl installation and the lowest is 60°. Found also where the higher the air velocity flame height will be shortened but the fire temperature will be higher. And the speed variation of fuel we get the result that the higher the speed of the fuel, the fire will be higher but the flame temperature will decrease

**Key word:** *Combustion, Swirl Burner, Simulation, Non-Premixed, K- model*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembakaran merupakan bagian terpenting dalam kehidupan manusia, terutama pada dunia teknik dan industri sangat memerlukan bahan bakar untuk melakukan proses produksi. Hampir semua industri menggunakan proses pembakaran, antara lain : Pembangkit listrik, industri logam, industri kimia, industri bahan mentah, dan lain sebagainya. Pada suatu industri pasti memerlukan proses pembakaran yang sangat besar. Tidak dapat kita pungkiri pembakaran dalam skala besar pasti memerlukan bahan bakar yang besar juga. Saat ini bahan bakar fosil memiliki persediaan yang semakin menipis. Jika hal ini terus dibiarkan, maka bahan bakar fosil akan menjadi langka dimasa yang akan datang. Karena hal tersebut itu sangat diperlukan yang lebih efisien. Dengan adanya pembakaran yang efisien diharapkan konsumsi bahan bakar dapat diminimalkan. Bentuk dari ruang bakar juga sangat mempengaruhi konsumsi bahan bakar. Ruang bakar merupakan tempat terjadinya reaksi pembakaran. Ruang bakar yang baik adalah ruang bakar yang memenuhi kebutuhan untuk suatu proses. Dengan mendesain ruang bakar diharapkan kita dapat meminimalisir hilangnya atau berlebihnya energi yang digunakan.

Untuk mengatasi hal-hal tersebut kita memerlukan pemahaman khusus tentang karakteristik dari nyala api dan proses bagaimana terjadinya pembakaran. Pembakaran merupakan proses reaksi kimia antara oksidiser dan bahan bakar yang menghasilkan panas. Proses pembakaran sangat banyak pengaplikasiannya, seperti pada : mesin jet, mesin motor bakar, pada boiler, dsb. Tujuan dari proses pembakaran ini sendiri digunakan sebagai supply energy untuk melakukan suatu proses. Pembakaran sendiri dipengaruhi oleh beberapa aspek antara lain: kualitas bahan bakar, laju aliran, turbulensi, udara excess pembakaran, geometri nozzle. Untuk kualitas bahan bakar akan berpengaruh pada efisiensi konsumsi bahan bakar. sedangkan bentuk nozzle akan mempengaruhi bentuk dari nyala api, laju alir dan turbulensi berdampak pada suhu api yang dihasilkan

Penelitian akan pembakaran sering dilakukan oleh pengalaman kerja saja (*eksperiment*) dan masih belum banyak yang meneliti pembakaran secara terperinci untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada pembakaran. Dengan menggunakan simulasi diharapkan kita dapat mengetahui fenomena yang terjadi pada pembakaran pada pemasangan *swirl*. Dengan kita mengetahui fenomena yang terjadi pada pembakaran, diharapkan kedepannya kita dapat memperbaiki eksperimen untuk selanjutnya.

Sebelum kita melakukan percobaan kita sebaiknya melukan percobaan dengan simulasi (eksperimental semu) terlebih dahulu. Hal ini ditujukan agar dalam pembuatan alat atau eksperimen nantinya dapat berjalan sesuai yang diharapkan. Sehingga tidak memerlukan banyak biaya dalam membuat sebuah alat. Pada simulasi kita menggunakan persamaan-persamaan teoritis sehingga dapat diketahui pendekatan fenomena yang terjadi pada alat yang akan di uji nantinya

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam pengerjaan penelitian ini adalah

1. Bagaimana distribusi temperatur, kecepatan fluida pada pembakaran *non premix* deengan penambahan *swirl burner* dengan eksperimental semu?
2. Bagamana fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran dengan menggunakan pendekatan numerik?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dari materi skripsi yang penulis ajukan lebih terarah, maka perlu diberikan batasan masalah. Batasan masalah dari skripsi ini adalah:

1. Ditinjau secara dua dimensi
2. Menggunakan permodelan pada *swirl burner*
3. Dilakukan dengan menggunakan simulasi

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan ini adalah sebagai berikut

1. Mengatahui pendekatan distribusi temperature, kecepatan fluida, pada pembakaran *non-premixed* dengan menggunakan *swirl burner* dengan eksperimental semu
2. Mengetahui fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran dengan menggunakan pendekatan numerik

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Memberikan wawasan mengenai simulasi numerik pada distribusi panas, kecepatan aliran fluida, distribusi densitas pada pembakaran *non premixed* dengan *swirl burner*, agar dapat digunakan referensi untuk eksperimen selanjutnya
2. Memberikan wawasan mengenai pengaruh fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran *non-premixed* dengan *swirl burner*, agar dapat digunakan sebagai acuan untuk eksperimen selanjutnya
3. Dapat digunakan sebagai sarana validasi untuk ekperiment yang selanjutnya

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

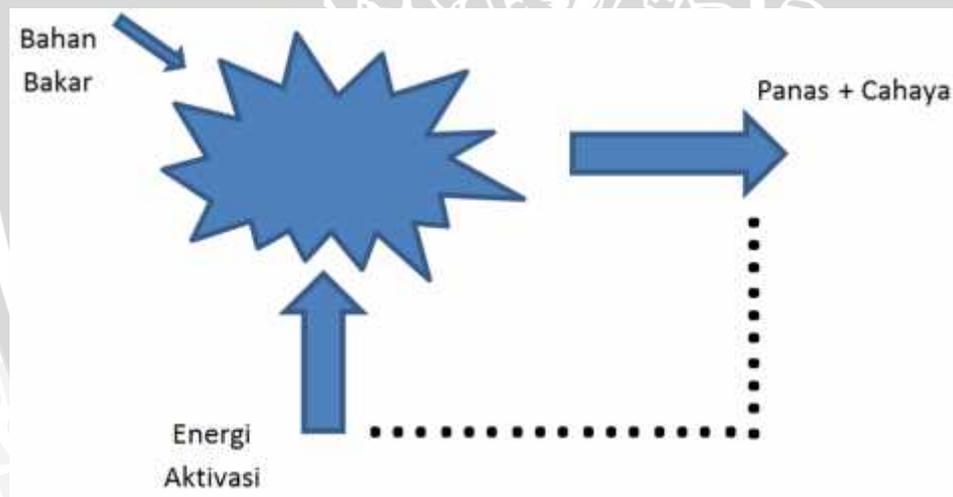
Braikia (2015) melakukan penelitian tentang simulasi numerik dari hubungan turbulen jet. Pada penelitian ini Braika melakukan perbandingan antara persamaan RSM dengan K- model. Dengan menetapkan aliran pada  $Re\ 3.10^4$  dan menentukan *swirl* number dari perhitungan yaitu 1.33. Braika melakukan simulasi dengan menggunakan penyelesaian finite-volume. Berdasarkan SIMulasi yang dilakukan, menunjukkan bahwa hasil persamaan RSM lebih mendekati eksperimen nyata dari pada menggunakan K- . Dikarenakan pada RSM persamaanya lebih kompleks

Tri Agung (2015) Melakukan simulasi numerik terhadap pengaruh pengaturan jarak *swirl* terhadap karakteristik pembakaran difusi pada aliran sembur *double concentric*. Pada penelitian ini dilakukan simulasi numerik dengan menggunakan Fluent versi 6.1. Bahan bakar yang dipakai adalah propana dengan menggunakan persamaan turbulensi K- . Data-data yang diambil adalah distribusi fraksi campuran, temperatur, kecepatan, fraksimassa spesies dan intensitas turbulensi. Adapun variasi yang diamati adalah: 1. Variasi besar sudut, jumlah sudu dan penempatan jarak *swirl* pada kondisi kecepatan bahan bakar, udara primer dan udara sekunder konstan. 2. Variasi dan penempatan jarak *swirl* pada kondisi kecepatan bahan bakar dan udara primer konstan Dari hasil penelitian menunjukkan dengan penambahan jarak *swirl* pada saluran udara primer , harga kecepatan tangensial, intensitas turbulensi dan temperatur semakin menurun, proses pembakaran menjadi tidak efisien karena sebagian kalor pembakaran terbuang keluar. Bentuk api tambah memanjang searah sumbu ruang bakar

Brancho (2015) melakukan eksperimental semu dengan menggunakan ANSYS FLUENT 15.0 untuk mengetahui pengaruh oksidator terhadap nyala api. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan gas alam (75%) dan hydrogen (25%) sebagai bahan bakar dan untuk oksidator 35%  $O_2/65\% N_2$ ; 35% $O_2/32.5\%N_2/ 32.5\% CO_2$ ; dan 35%  $O_2/20\% N_2/45\% CO_2$ . Hasilnya nyala api yang paling panas terdapat pada percobaan pertama. Dimana pada oksidator tersebut tidak terdapat kadar  $CO_2$ .

## 2.2 Pembakaran (Reaksi Pembakaran)

Pembakaran merupakan salah satu dari proses konversi energi yang paling penting, dimana pembakaran merupakan sebuah proses merubah energi kimia dari bahan bakar menjadi panas yang akan di lepas ke lingkungan, karena hal ini pembakaran termasuk proses oksidasi eksotermis. Proses pembakaran sendiri dapat berlangsung jika terdapat bahan bakar, pengoksidasi (oksigen/udara), panas atau energi aktivasi. Panas atau energi disini diperlukan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar. Panas atau energi yang dipakai untuk mengaktifkan molekul molekul bahan bakar disebut energi aktivasi. Energi aktivasi mengaktifkan molekul molekul bahan bakar dengan memutus ikatan ikatan bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat reaktif. Ion ion bahan bakar kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.



Gambar 2.1 Ilustrasi proses pembakaran  
Sumber : Wardana (2008)

Ada dua hal yang sangat penting yang harus dipenuhi agar proses pembakaran bisa berlangsung yaitu:

1. Kestimbangan Masa
2. Kestimbangan Energi

Kestimbangan masa yang diperlukan tersebut oleh para ahli kimia disebut stoikiometri, dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi

berbagai produk. Pengoksidasi yang paling lazim adalah udara, yang untuk berbagai campuran dari 21 persen oksigen dan 79 persen nitrogen (fraksi mol atau volume). Jadi persamaan kimia dari pembakaran stoikiometrik dari metana ( $\text{CH}_4$ ) dengan udara adalah



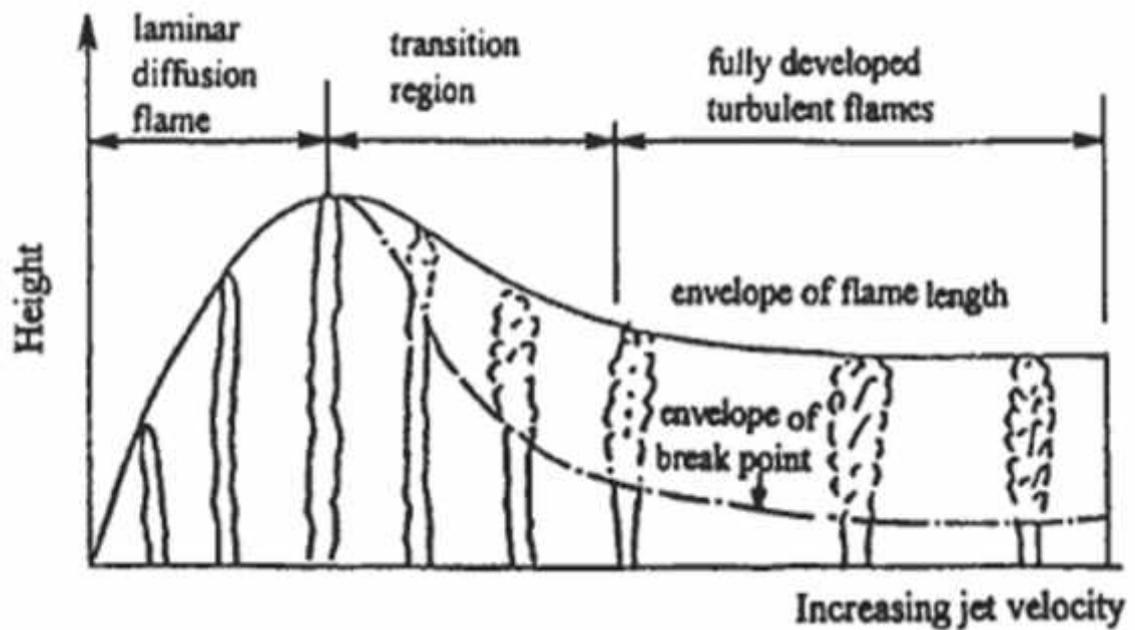
Salah satu karakter pembakaran ditentukan oleh cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi. Jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran *premixed*. Apabila reaktan tidak bercampur sebelum terbakar maka pembakaran termasuk jenis pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekul. Pada penelitian kali ini jenis pembakaran yang digunakan adalah pembakaran difusi.

### 2.3 Pembakaran Difusi

Pembakaran Difusi adalah proses pembakaran di mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau  $\text{O}_2$ ) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Pada pembakaran difusi, api akan muncul pada batas antara daerah bahan bakar dan udara. Produk pembakaran dihasilkan dari api yang menyebar pada kedua sisi, dimana oksigen dan bahan bakar akan berdifusi pada aliran tersebut supaya tercampur. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya.

Perhitungan yang dapat digunakan mengenai api dari proses pembakaran difusi adalah dengan melakukan perhitungan pada visualisasi tinggi api. Tinggi api sendiri dapat didefinisikan sebagai suatu jarak aksial nyala api dari mulut tabung pembakar sampai pada suatu titik dimana ujung nyala api tersebut mencapai garis sumbunya.

Semisal pada suatu pembakaran difusi dimulai dari kecepatan aliran yang rendah, tinggi api akan semakin tinggi seiring dengan tingginya kecepatan aliran kemudian mencapai titik maksimumnya. dimana kondisi api laminar, dan tinggi api akan menurun. Sesaat sebelum tinggi maksimum api tercapai, api akan mulai bergerak pada bagian puncaknya (menjadi turbulen). Hal ini memishkan api difusi laminar dan api transisional. Semakin tinggi kecepatan aliran, getaran api semakin bertambah dan menuju ke arah bawah. Pada kondisi ini api transisi berubah menjadi api turbulen



Gambar 2.2 : Perubahan tinggi api dengan penambahan kecepatan aliran  
 Sumber : mahallawy, saad (2002))

Panjang api berbanding lurus dengan kecepatan pancaran bahan bakar yakni panjang api meningkat dengan peningkatan kecepatan pancaran. Semakin cepat pancaran bahan bakar ujung api mulai tidak stabil. Dan pada daerah transisi terlihat ketidak stabilan api, dimana ketidakstabilan ini disebabkan gaya geser pada batas jet dengan lingkungan. Setelah ketidak stabilan Nampak panjang, api difusi kemudian akan memendek sampai api menjadi stabil pada level tetap. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2 di atas ini.

#### 2.4 Kestabilan Api

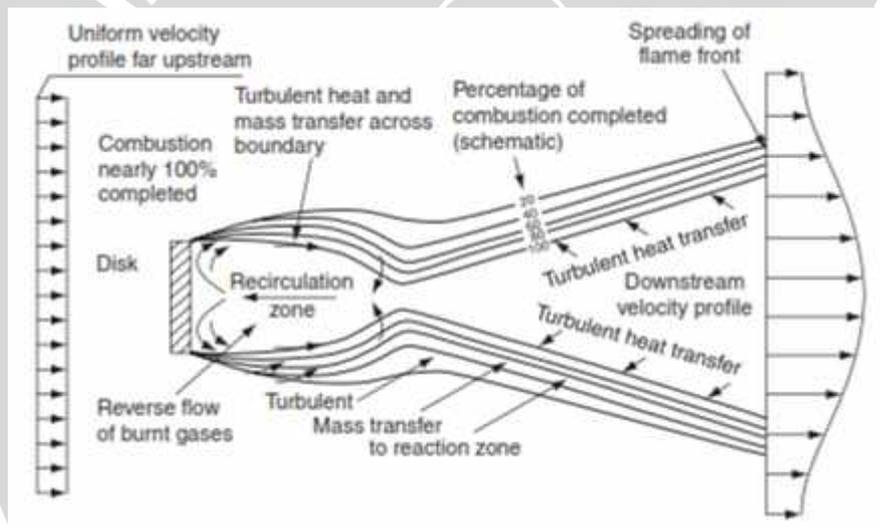
kestabilan api umumnya menjelaskan batas operasional sistem pembakaran yang dinyatakan pada dua kondisi aliran yaitu *lift off* dan *blow out*. Untuk mendapatkan produk pembakaran yang baik maka membutuhkan aliran yang stabil pada suatu *burner*. Maka dari itu *burner* harus mampu untuk menstabilkan api hasil pembakaran. Batas kestabilan api merupakan faktor paling penting yang harus dikontrol ketika membuat desain suatu *burner*. *Bunsen burner* tidak dapat menstabilkan api yang turbulen, maka banyak penelitian untuk memperbaiki stabilitas dari *burner* dengan menciptakan *recirculation*.

Batas kestabilan api menjelaskan batas operasional dari sistem pembakaran yang berhubungan dengan kestabilan api difusi yaitu *lift off* dan *blow out*. Apabila kecepatan reaktan lebih kecil dari kecepatan produk maka api akan bergerak menuju mulut nosel,

kejadian ini disebut *flash back*. Jika kecepatan reaktan lebih besar dari kecepatan produk maka api akan bergerak menjauh dari mulut nosel dan kejadian ini disebut *lift off*. Kondisi kritis kestabilan ini sangat bergantung pada konfigurasi aliran. Pada aliran berkecepatan rendah, kondisi api adalah laminar. Kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada dalam kondisi turbulen. Api akan mengalami *lift off* dari posisi *burnernya* bila kecepatan keluarannya tinggi. Panjang *lift off*, yaitu jarak antara mulut *burner* dan pangkal api, akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan alirannya sampai api mengalami *blow out* (padam).

### 2.5 Recirculation

Untuk mendapatkan kestabilan api maka dibutuhkan suatu *recirculation*. *Recirculation* dibagi menjadi dua yaitu *inner recirculation* dan *outer recirculation*.



Gambar 2.3 : Zona *Recirculation* dan Daerah Pancaran Api

Sumber : *Glassman* (2008)

Ketika kita meletakkan *bluff body* pada mulut *burner*, maka akan terjadi *inner recirculation*. Selain itu *inner recirculation* juga dapat dicapai dengan memasang sudu pada mulut *burner*, hal ini termasuk *inner recirculation aerodinamik*. Adanya zona *recirculation* yang kembali pada mulut *burner* menyebabkan adanya batas gesekan karena terdapat perbedaan kecepatan. Dengan adanya *recirculation* maka api akan terus menerus memantik campuran bahan bakar.

Pada penelitian ini pemasangan *swirling vanes* pada aliran udara akan menghasilkan suatu aliran yang bersirkulasi, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan udara

reaktan. Hal ini akan merubah rambatan gelombang pembakaran stasioner dari laminar menjadi turbulen sehingga bidang kontak antar reaktan menjadi semakin luas,. Semakin besar aliran yang bersirkulasi maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya luasan daerah kestabilan api juga semakin bertambah atau bisa dikatakan kestabilan api mengalami peningkatan dan akan mempengaruhi visualisasi dari bahan bakar.

## 2.6 Swirling Vanes

Telah lama diketahui bahwa pemasangan *swirler* pada pembakaran difusi merupakan komponen yang efektif untuk menstabilkan api. Di mana pada penelitian ini pemasangan *swirler* akan diletakkan pada saluran udara. Dengan pemasangan *swirler* akan meningkatkan maksimum pembakaran yang memungkinkan tanpa menghilangkan stabilitas dari pemantikan api. Karena *Swirling Vanes* disini berperan sebagai hambatan aliran yang menyebabkan adanya turbulensi dari aliran. Di mana terdapat olakan olakan, di lain sisi *swirler* lebih efektif dibandingkan alat penstabil karena *swirler* juga mampu menghilangkan kandungan gas hasil pembakaran yang tidak berguna.

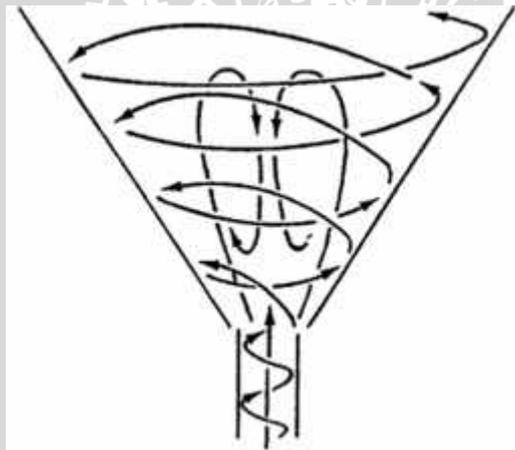


Gambar 2.4: *Swirl vanes*  
Sumber : Martin (2006)

Gambar 2.3 merupakan contoh bentuk *swirl vanes*. Seperti telah diketahui sebelumnya bahwa adanya *swirler* sebagai hambatan pada aliran udara akan menyebabkan terjadinya aliran turbulen. Aliran turbulen sendiri terjadi dikarenakan adanya *recirculation* yang terjadi pada produk hasil pembakaran. Karena udara melewati *swirler* maka akan terjadi perbedaan kecepatan udara ketika sebelum dan sesudah

melewati *swirler* yang telah dinyatakan dengan persamaan kontinuitas. Sebelum melewati *swirler*, udara memiliki kecepatan normal, kemudian udara akan menabrak *swirler* dan akan mengalami penurunan kecepatan pada *swirler* seiring dengan kenaikan tekanan, dan setelah udara melewati *swirler* maka kecepatannya akan meningkat seiring dengan penurunan tekanan.

Setelah didapatkan kecepatan aliran udara yang lebih cepat dengan tekanan yang lebih rendah, pada aliran bahan bakar terdapat kenaikan tekanan sehingga pada produk api terdapat perbedaan tekanan. Seperti yang telah kita ketahui pada transport fenomena, perbedaan gradien tekanan akan menyebabkan transport fenomena dari tekanan tinggi menuju tekanan rendah, dalam hal ini aliran gas akan kembali ke arah *burner* inlet, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Sehingga, gas yang keluar dari *burner* akan mengalami pemanasan awal yang menyebabkan energi kinetik molekul bergerak menjadi lebih cepat sehingga pemncampuran reaktan menjadi lebih baik dan didapatkan produk pembakaran yang lebih baik.



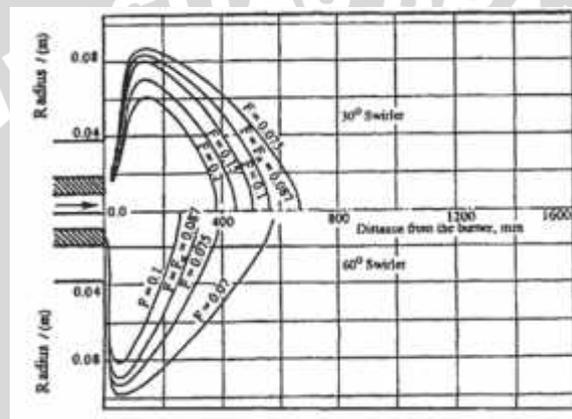
Gambar 2.5 : Aliran *Recirculation* yang disebabkan oleh Pusaran Kuat  
Sumber : Lilley (2011)

Karena efek dan intensitas pengadukan dan momentum bahan bakar menjadi tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 central jet mendorong aliran dengan arah yang berlawanan. Perpindahan massa antara central jet dan aliran yang berlawanan terjadi dengan adanya *recirculation* pada central jet dan bercampur kemudian kembali *berecirculation*.

## 2.7 Visualisasi

Liley (1997) menyatakan bahwa adanya *swirl* akan mempengaruhi visualisasi api dimana tekanan ke arah radial akan menjauhi mulut nosel, sehingga zona *recirculation* akan bergeser dan mendekati mulut nosel sehingga api akan mengalami pemanjangan ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

El Mahallawy juga melakukan penelitian untuk melihat pengaruh angka *swirl* terhadap visualisasi api. Seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini menunjukkan bahwa *swirl* dengan sudut yang berbeda memberikan visualisasi yang berbeda pula. Dan semakin tinggi angka *swirl* maka api pada arah aksial akan semakin pendek



Gambar 2.6 : Campuran Bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada Api Difusi  
Sumber : mahallawy, saad (2002)

Untuk menunjukkan pengaruh aliran *swirl* secara kuantitatif Cheng, R.K, et. Al (2000) mendefinisikan *swirl number* seperti pada rumus di bawah ini. *Swirl Number* merupakan bilangan tak ber dimensi yang menunjukkan perbandingan laju momentum angular dengan laju aksial. Semakin meningkat harga  $Sn$  sampai melebihi 0,6 akan menghasilkan *recirculation* yang lebih baik karena timbul gradien tekanan radial dan aksial yang relative cukup besar

$$Sn = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{sm}}\right)^2}{1 - \left(\frac{D_{sm}}{D_{hub}}\right)^2} \right] \tan \theta \quad (\text{Lilley, 2011}) (2-1)$$

Di mana:

$D_{hub}$ : Diameter nozzle annular dalam

$D_{sm}$ : Diameter nozzle annular luar

## 2.8 Transport Fenomena

Transport Fenomena adalah suatu fenomena yang berhubungan dengan kecenderungan temperatur, konsentrasi dan kecepatan suatu partikel untuk berubah sehingga mencapai nilai yang sama. Tiga hal pokok yang dipelajari pada transport fenomena antara lain:

1. Mekanika Fluida,
2. Perpindahan Panas
3. Tranfer Massa.

Mekanika Fluida berhubungan dengan perpindahan momentum pada suatu fluida. Pada skala molekular, molekul akan bertumbukan dengan molekul lain sehingga terdapat perpindahan momentum antar molekul, pada skala yang lebih besar tumbukan antar molekul akan menunjukkan bagaimana aliran fluida tersebut apakah laminar atau turbulen. Perpindahan Panas berhubungan dengan panas yang berpindah dari suatu fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju temperatur yang lebih rendah dan Transfer Massa berhubungan perpindahan massa pada suatu fluida karena perbedaan konsentrasi dari suatu fluida. Ketiga hal pokok pada transport fenomena memiliki suatu kesamaan yaitu, sama sama memindahkan sesuatu pada fluida yaitu momentum, temperatur, dan massa yang lebih tinggi menuju yang lebih rendah.

Rumus matematik dari transport fenomena didasarkan pada dua hal yaitu laju perindahan dari fluida sebanding dengan *driving force* yang diberikan pada suatu fluida dan Massa dan Energi tidak dapat dimusnahkan. Hukum dari transport fenomena didapatkan dari hukum setiap hal pokok pada transport fenomena yaitu:

- Hukum Newton, Mekanika Fluida

$$\mu \frac{du_x}{dx} = \tau$$

(Bird, Stewart, Lightfoot 2002)(2-2)

dimana:

$\mu$  = viskositas fluida

$u_x$  = kecepatan fluida

$\tau$  = tegangan geser fluida

- Hukum Fourier, Perpindahan Panas

$$-kA\left(\frac{dT}{dx}\right) = q$$

(Bird, Stewart, Lightfoot 2002)(2-3)

Dimana:

k= konduktifitas termal

A=luas daerah perpindahan panas

T= temperatur

q= laju perpindahan panas per waktu

- Hukum Fick, Tranfer Massa

$$-D_{AB}\left(\frac{dC_A}{dx}\right) = J_A$$

(Bird, Stewart, Lightfoot 2002)(2-4)

Dimana:

$D_{AB}$ = difusifitas A ke B

$C_A$ = konsentrasi A

$J_A$ = Flux molar dengan kecepatan molar rata rata

## 2.9 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah ilmu yang meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperature diantara material. Dari hukum termodinamika, telah diketahui bahwa energi yang dipindahkan disebut energi panas. Istilah-istilah yang digunakan untuk menyatakan tiga modulus perpindahan panas antara lain yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Masalah yang melibatkan konduksi panas dalam zat padat dapat disederhanakan menggunakan persamaan diferensial tunggal, persamaan konduksi panas. Persamaan dapat diturunkan dengan membuat keseimbangan energi panas pada elemen volume diferensial. Konduksi akan terjadi apabila terdapat gradient suhu di dalam media padat (stasioner cairan).

### 2.9.1 Konduksi

Konduksi adalah transfer energi dari partikel-partikel zat yang lebih energik untuk mendekati partikel yang kurang energi sebagai akibat dari interaksi antara partikel. Konduksi dapat berlangsung di padatan, cairan atau gas. Pada gas dan cairan, konduksi terjadi karena difusi molekul selama gerakan secara acak. Pada padatan, konduksi terjadi karena adanya kombinasi dari getaran molekul-molekul dalam kisi-kisi dan transportasi energi oleh elektron bebas.

Tingkat konduksi panas melalui media tergantung pada geometrinya, material medium, ketebalan media, serta perbedaan suhu di media. Konduksi dapat ditunjukkan dengan rumus :

$$R = \frac{l}{kA} \propto \frac{1}{k} \quad \text{(Cengel,2002)(2-5)}$$

atau,

$$\dot{Q}_c = k \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} (W) \quad \text{(Cengel,2002)(2-6)}$$

Dimana konstan proporsionalitas k adalah konduktivitas termal bahan, merupakan ukuran kemampuan bahan untuk melakukan panas. Dalam kasus membatasi  $x = 0$ , persamaan diatas dapat disederhanakan ke dalam bentuk diferensial

$$\dot{Q}_c = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} (W) \quad \text{(Cengel,2002)(2-7)}$$

Keterangan :

- Q = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)
- K = Konduktivitas termal bahan (Watt/m°C)
- A = Luas penampang pada posisi normal arah perpindahan panas (m<sup>2</sup>)
- T = Beda temperatur pada penampang (°C)
- x = Tebal material (m)

### 2.9.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas dari satu tempat ke tempat lainnya karena adanya perpindahan fluida, proses perpindahan panasnya melalui perpindahan massa. Konveksi juga dapat diartikan sebagai transfer energi antara permukaan padat atau cair pada satu suhu dan cairan yang bergerak, melibatkan gabungan efek dari gerakan konduksi dan cairan. Semakin cepat gerakan fluida, maka semakin besar perpindahan panas konveksi.

Proses perpindahan panas yang melibatkan perubahan fase cairan dapat dianggap sebagai konveksi karena adanya pergerakan fluida yang terjadi selama proses, contohnya adalah ketika muncul gelembung uap pada saat kita merebus air. Laju perpindahan panas konveksi diamati untuk menjadi pembanding perbedaan suhu, dan dinyatakan dalam hukum pendinginan Newton sebagai

$$\dot{Q}_c = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (\text{Cengel,2002})(2-8)$$

Keterangan :

- Q = Kalor yang dipindahkan (Joule)
- h = Koefisien konveksi (W/m<sup>2</sup>K)
- A = Luas penampang melintang (m<sup>2</sup>)
- T<sub>s</sub> = Suhu sekitar (°C)
- T = Suhu Ambient (°C)

### 2.9.2 Radiasi

Radiasi adalah sebuah energi yang terpancar melalui gelombang elektromagnetik (*foton*). Tidak seperti konduksi dan konveksi. Perpindahan energi dengan radiasi tidak membutuhkan perantar media. Pada kenyataannya, energi berpindah dengan cepat (pada kecepatan cahaya) dan dapat bergerak melewati ruang *vacum*. Hal ini menjelaskan bagaimana panas dari sinar matahari dapat sampai kebumi

Pada perpindahan panas kita mempelajari tentang perpindahan panas melalui radiasi. Yang mana radiasi memancar dari suatu benda karena temperaurnya. Seperti pada pemancar elektromagnetik seperti sinar x, sinar gamma, microwave, gelombang radio, dan gelombang televisi tidak memiliki temperature. Karena semua benda tersebut tidak memiliki pancaran temperature

$$Q = \varepsilon A_s \Delta T$$

(Cengel,2002)(2-9)

Dimana

$Q$  = Jumlah panas yang ditransfer

$\varepsilon$  = emissivity dari benda

$\sigma$  = konstanta boltzman

$A_s$  = luas penampang benda

## 2.10 Aliran Turbulen

Aliran turbulen merupakan suatu fenomena yang sangat sering kita jumpai pada kehidupan teknik. Contohnya pada aliran jet, aliran pada pipa, aliran pada plat datar, dan banyak lagi

Turbulensi adalah suatu pola aliran yang tidak beraturan, sehingga nilai dari kecepatan dan tekanan fluida selalu berubah ubah terhadap fungsi waktu dan jarak aliran. Disini pemodelan diselesaikan dengan metode CFD menggunakan persamaan NavierStokes yang memperhitungkan fluktuasi yang terjadi, dimana efek dari fluktuasi kecepatan ini akan menimbulkan penambahan dari tegangan pada fluida kerja seperti terlihat pada gambar 2.7 dibawah ini



Gambar 2.7: Aliran Turbulen

Sumber : Cengel (2004)

### 2.10.1 Bilangan Reynold

Bilangan reynold merupakan suatu parameter yang sering digunakan dalam mengidentifikasi suatu aliran yang turbulen. Dari bilangan reynold kita dapat mengetahui seberapa besar perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskositas pada suatu aliran fluida. Untuk persamaan turbulen dapat dituliskan dengan persamaan berikut

$$R = \frac{\rho u L}{\mu}$$

Cengel (2004)(2-10)

Dimana

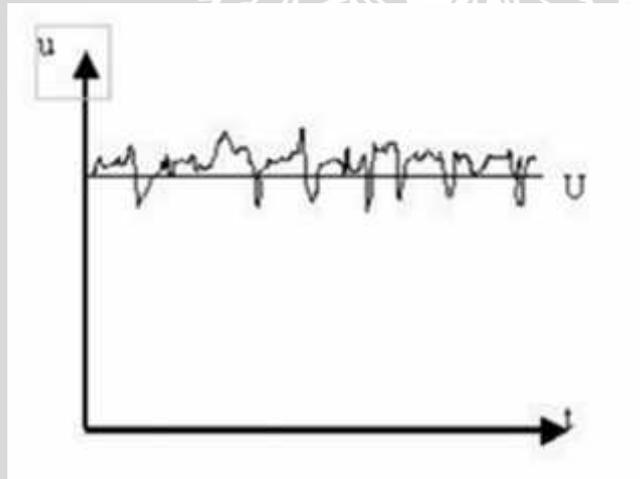
$u$  = kecepatan aliran

$L$  = jarak

$\nu$  = viskositas kinematic

Berdasarkan persamaan reynold diatas, aliran turbulen dapat kita identifikasi.

Dimana karakteristik aliran yang tidak stabil memiliki bilangan reynold yang tinggi lebih dominan dari gaya viscous. Pada bilangan reynold dikenal nilai  $R_{crit}$  dimana nilai ini menunjukan daerah transisi dari laminar dan turbulen. Aliran yang bersifat laminar bilangan reynold  $< R_{crit}$ , dan sebaliknya aliran yang turbulen akan lebih besar dari nilai  $R_{crit}$ . Pada kondisi turbulen pola aliran akan tampak acak dimana parameter kecepatan dan tekanan akan berfluktuasi

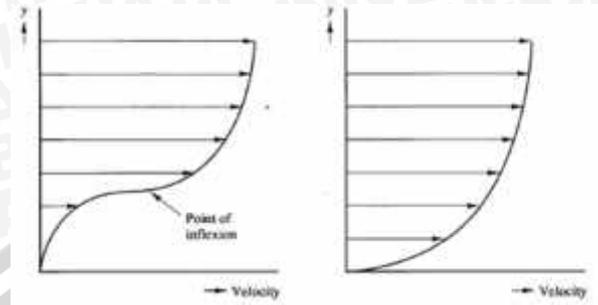


Gambar 2. 8 : Pola aliran unsteady kecepatan aliran terhadap waktu  
Sumber : Malalasekera (1995)

### 2.10.2 Transisi Laminar ke Turbulen

Proses perubahan aliran laminar menuju turbulen adalah sebuah fenomena yang berkaitan dengan kestabilan dari aliran fluida. Kestabilan aliran fluida merupakan suatu parameter yang dapat dijelaskan menggunakan metode *hydrodynamic instability*. Metode *hydrodynamic instability* merupakan suatu metode yang mengidentifikasi suatu bata

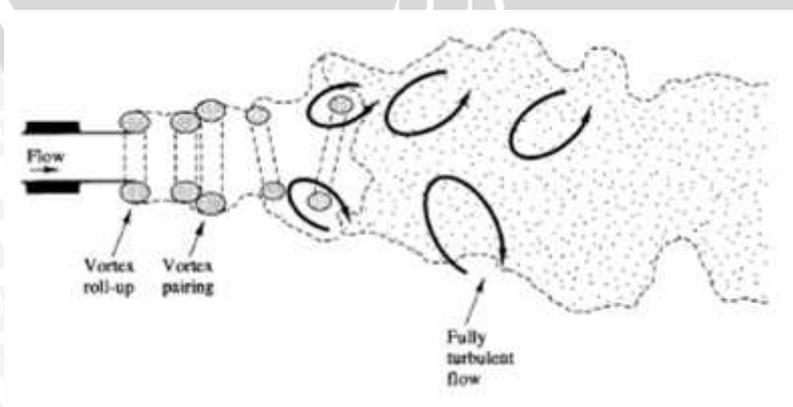
kondisi transisi aliran pada saat diberikan gangguan yang lebih pada aliran tersebut, yaitu dengan mempredikiskan nilai dari bilangan reynold  $Re$  mulai mengalami gangguan dimana aliran akan mengalami transisi dari laminar ke turbulen



Gambar 2.9: Grafik profile kecepatan (a) transisi turbulen (b) laminar  
Sumber : malalasekera,1995

Grafik diatas menunjukkan batas dari profil kecepatan. Dimana grafik (a) adalah grafik aliran transisi turbulen yang menyebabkan ketidak teraturan dari profil kecepatan. *Point of inflexion* adalah titik ketidak stabilan dari profil kecepatan akibat dari terjadinya gejala dari aliran. Dan untuk grafik (b) adalah grafik profil kecepatan laminar. Dari gambar 2.9 Diatas menjelaskan *hydrodynamic instability* dimana viskositas berpengaruh atas kestabilan aliran fluida. Viskositas berperan sebagai peredam dari fluktuasi yang terjadi pada saat aliran akan menjadi turbulen.

Untuk mendeskripsikan aliran turbulen maka kita memerlukan eksperimen untuk mengetahui karakteristik aliran pada jet. Kondisi batas pada aliran plat pada pipa. Gambar 2.10 Dibawah ini menunjukkan transisi pada aliran jet. Terlihat bahwa pada saat gangguan diperbesar maka akan menghasilkan aliran yang turbulen



Gambar 2.10 : Aliran Transisi  
Sumber : Malalsekera (1995)

Pada gambar 2.10 terlihat bahwa aliran yang keluar dari mulut jet mula-mula lamiar dan berubah menjadi turbulen pada ujungnya akibat adanya gangguan aliran. Selanjutnya aliran akan membentuk aliran dengan struktur berputar. Pusaran tersebut terus berkembang, gabungan dari aliran yang membentuk pusaran tersebut akan menyebabkan aliran menjadi

### 2.11 Efek Konservasi Massa dan Energi Terhadap Aliran

Pada konservasi massa dan energi kita ketahui bahwa energi tidak dapat dimusnahkan. Ide ini kemudian digabungkan dengan konsep mekanika fluida dengan menggunakan persamaan kontinuitas dengan dasar konservasi massa dan persamaan Navier Stokes dengan dasar persamaan momentum.

Persamaan Kontinuitas merupakan salah satu persamaan dasar mekanika fluida. Persamaan ini menyatakan bahwa massa fluida yang masuk pada pipa satu dengan massa fluida yang keluar pada pipa dua adalah sama, dan hasil kali antara luas penampang  $A$  dan kelajuan  $v$  pada titik sembarang selalu konstan. Persamaan kontinuitas dapat dituliskan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

(2-11)

Persamaan di atas berlaku untuk aliran tunak maupun tak tunak, dalam fluida termampatkan atau tak termampatkan. Aliran fluida disebut tunak jika kecepatan di setiap titik yang diberikan konstan terhadap waktu. Aliran fluida disebut tak termampatkan jika fluida yang mengalir tidak mengalami perubahan volume atau massa jenis. Fluida ideal adalah fluida yang tak termampatkan, tidak kental, dan tidak memiliki aliran tunak. Dalam notasi vector persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0$$

(2-12)

Persamaan momentum untuk massa, dapat dicari dengan hukum kedua Newton dimana:

$$d\vec{F} = dm \frac{d\vec{v}}{dt} \Bigg|_{\text{system}}$$

(2-13)

Untuk aliran tak termampatkan dengan viskositas konstan, persamaan ini dapat disederhanakan ke bentuk:

$$\begin{aligned}\rho \frac{dv_x}{dt} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad (2-14)$$

Dari penurunan persamaan kontinuitas dan momentum untuk mendapatkan persamaan Navier Stokes dari konservasi massa dan energi didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z\end{aligned}\quad (2-15)$$

Dengan:

adalah densitas fluida

- $\frac{d}{dt}$  adalah derivative substantive (derivative material)
- $\mathbf{v}$  adalah vector kecepatan
- $\mathbf{p}$  adalah tensor yang menyatakan gaya gaya permukaan yang bekerja pada partikel fluida.

Faktor yang membedakan dari pemodelan laminar dan trubulen adalah pada munculnya efek *eddy motion* pada aliran trubulen tersebut. Untuk itu kita memerlukan simulasi CFD terhadap aliran trubulen dengan mempertimbangkan efek *eddy motion* (gerakan yang memutar) di setiap aliran. Untuk itu analisa dilakukan dengan cara

pendekatan persamaan Navier Stokes dengan parameter menurut fungsi waktu sehingga kita dapat melihat pengaruh fluktuasi parameter aliran fluida terhadap aliran utama tersebut

Pada eksperimen kali ini menggunakan pembakaran *non-premixed* dengan menggunakan *swirl*. *Swirl* digunakan untuk memunculkan aliran turbulensi agar terjadi aliran *recirculation*. *Recirculation* ini diharapkan dapat memperbesar mixing antara bahan bakar dengan oksidator. Sehingga kualitas pembakaran diharapkan dapat ditingkatkan.

Pada teori pemodelan turbulen kita meninjau dari pemngamatan terhadap batas aliran. Dari persamaan konservasi massa diatas maka kita dapat memodelkan aliran fluida yang mendekati sesungguhnya. Pendekatan yang dilakukan ini dengan cara mengekspresikan perubahan dari nilai variable  $y$  dengan varabel  $x$

## 2.12 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational fluid dynamic (CFD) adalah suatu perhitungan yang digunakan untuk memprediksikan aliran dalam pipa ataupun pada plat datar. Pada tahun 1980 penyelesaian dari aliran fluida sudah memakai metode CFD. Pada dunia engineer penyelesaian dengan cara CFD sangat dibutuhkan sebagai sarana experiment dan sebagai sarana mendesain suatu aliran pada sebuah industri. CFD digunakan untuk memecahkan persamaan-persamaan yang sangat rumit

Selain kita dapat memprediksikan aliran fluida, dengan CFD kita juga dapat menganalisis suatu system pada perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lainnya. CFD ini sendiri merupakan sebuah teknik perhitungan berbasis komputer yang digunakan untuk mensimulasikan suatu sistem. Pada bidang teknik CFD mempunyai peranan yang sangat penting pada bidang industri maupun *non* industri seperti contoh :

- Pada bidang *aerodynamika* pada pesawat terbang dan kendaraan : *lift* dan *drag*
- *Hydrodynamika* pada kapal
- Pembangkit listrik
- Pada mesin-mesin turbo
- Pada bidang kimia seperti pada mixing, pembentukan polimer

Pada tahun 1960 perusahaan insutri pesawat luar angkasa sudah menerapkan teknik perhitungan CFD untuk mendesain. Selain itu masih banyak lagi industri-industri yang

menggunakan metode CFD ini. Perhitungan CFD biasa digunakan untuk pemrograman pada CAE (Computer Aided Engineering)

### 2.13 Pemodelan Aliran Turbulen

Pemodelan aliran turbulen adalah suatu metode perhitungan matematika yang dilakukan untuk melakukan pendekatan visualisasi pada aliran fluida. Dalam melakukan pemodelan aliran turbulen kita tidak perlu terlalu mendetail untuk mengamati fluktuasinya. Yang paling penting dalam hal ini adalah efek yang ditimbulkan dari aliran turbulen sehingga mempengaruhi aliran utama pada fluidanya. Pemodelan yang sering digunakan adalah *Reynold Stress*, *k-ε*, *Large Eddy Simulation*

#### 2.13.1 K-epsilon Model

Pemodelan K-epsilon merupakan pemodelan yang paling sederhana. Persamaan ini merupakan sebuah pendekatan untuk memprediksikan aliran turbulen pada suatu aliran. Pada pemodelan K-epsilon seluruh aliran dianggap turbulen. Dari pemodelan ini kita dapat mengetahui seberapa besar energi kinetik yang disebabkan oleh aliran turbulen tersebut dan berapa energi disipasinya. Energi disipasi disini menjelaskan tentang energi yang terdistribusi akibat adanya aliran turbulen tersebut

Turbulensi kinetik energi

$$\frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} = \nu \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_j^2} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right]$$

Persamaan disipasi

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

(Wilcox, 2006)(2-16)

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ , = konstanta disipasi pada permodelan  $k \ \epsilon$

$\epsilon = d \quad p \quad u \quad m$

$u_i =$  Mean velocity in tensor component

$\mu =$  viskositas dynamic

$\mu_t = \nu \quad t_i$

$x_i = \nu \quad p \quad p \quad n \quad t_i$

$x_j = m \quad \nu \quad cc$

### 2.13.2 Large Eddy Simulation(LES)

*Large eddy simulation* adalah pemodelan matematika untuk menyelesaikan aliran turbulen dengan metode CFD. *Lare eddy* pertama kali diusulkan oleh Joseph Smagorinsky untuk mensimulasikan udara atmosfer sekitar, dan pertama dikembangkan oleh Deardorff pada tahun 1970. LES sering diaplikasikan pada dunia engineer salah satunya: pembakaran, simulasi aliran pada dinding. Untuk persamaan *large eddy simulation* sebagai berikut :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left[ v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \tau_i \right] \right)$$

(Wilcox, 2006)(2-17)

$\bar{u}_i$  = kecepatan rata-rata pada vektor

$\tau_i$  = stress reynold spesifik

p = tekanan statistic turbulen

t = waktu

xi = posisi pada notasi vektor

### 2.13.3 K-omega model

Kolmogorov pada tahun 1942 menyatakan pemodelan turbulen dengan 2 persamaan untuk yang pertama. Kolmogorov menggunakan energi kinetik dari turbulen sebagai salah satu parameter turbulen. Parameter kedua yang digunakan adalah energi kinetik disipasi turbulen per unit,  $\omega$ . Pada pemodelan k-  $\omega$ ,  $\omega$  memberikan persamaan diferensial serupa pada persamaan kinetik k. Kolmogorov menjelaskan  $\omega$  sebagai nilai disipasi dari energy pada unit volume dan waktu.

Turbulen Kinetik Energi

$$\frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} = \tau_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \sigma \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right]$$

Nilai Disipasi Spesifik

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{\partial x_j} \tau_i \frac{\partial}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\sigma_\omega}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \sigma \frac{k}{\omega} \right) \frac{\omega}{\partial x_j} \right]$$

(Wilcox, 2006)(2-18)

$\omega$  = Nilai disipasi spesifik

$U_i$  = kecepatan pada vektor

$x_i$  = posisi pada vektor

$\nu$  = kinematik viskositas

$k$  = kinetik turbulen

$\tau$  = spesifik reynold stress

$\sigma, \beta$  = koefisien

## 2.14 Pembakaran Gas

Bahan bakar gas merupakan bahan bakar yang paling menguntungkan apabila dibandingkan dengan bahan bakar padat dan cair karena reaksi pembakaran gas yang lebih cepat dikarenakan jarak antar atom fase gas yang lebih besar sehingga pencampuran bahan bakar dan udara menjadi lebih baik. Hal ini menyebabkan pembakaran gas hanya membutuhkan sedikit *handling* dan sistem *burner* nya sangat sederhana dan hampir bebas perawatan. Selain itu, gas sebagai bahan bakar juga ideal karena umumnya bebas dari kandungan gas tidak terbakar atau residu padat. Bahan bakar gas pada umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar jika tercampur udara pada komposisi yang tepat.

Tabel 2.1 : Sifat-sifat Bahan Bakar Gas

Bahan bakar Gas	Massa Jenis Relatif	Nilai Kalor yang lebih tinggi kkal/Nm <sup>3</sup>	Perbandingan Udara/Bahan Bakar-m <sup>3</sup> udara terhadap m <sup>3</sup> bahan bakar	Suhu Nyala Api °C	Kecepatan Nyala Api m/s
Gas Alam	0.6	9350	10	1954	0.290
Propan	1.52	22200	25	1967	0.460
Butan	1.96	28500	32	1973	0.870

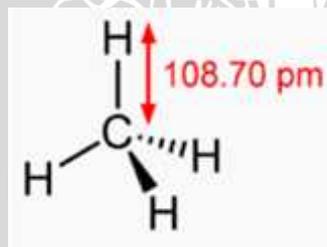
Bahan bakar gas pada umumnya dibagi menjadi dua yaitu gas alam dan gas buatan (*manufactured gas*). Komposisi gas alam sebagian besar terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>) dan sebagian kecil etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), serta pentane (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>). Terkadang pula sulfur, namun jumlahnya dapat diabaikan. Karbon dioksida dan Nitrogen merupakan komponen tak terbakar yang sering terdapat dalam gas alam dalam jumlah

yang sangat kecil. Sedangkan Bahan bakar gas buatan (*manufactured Gas*) banyak diproduksi melalui proses *gasifikasi* atau *karbonisasi* bahan bakar padat (terutama batu bara), dan beberapa proses lainnya. Jenis jenis bahan bakar gas buatan meliputi LPG (*Liquid Petroleum Gas*), *refinery oil gas*, *producer gas*, *water gas*, *blast furnace gas*, *wood gas*, *peat gas*, *coal gas*, *oven gas*, dan bio gas.

Proses Pembakaran gas menggunakan bahan bakar gas sendiri seringkali menggunakan peralatan yang disebut *gas burner*. Aliran pembakaran yang dihasilkan dari aliran ini bisa turbulen atau laminar bergantung dari konstruksi alat itu sendiri. Pada Penelitian kali ini *gas burner* akan ditambahkan *swirling vanes* untuk menstabilkan aliran api.

#### 2.14.1 Pembakaran Gas Metana (CH<sub>4</sub>)

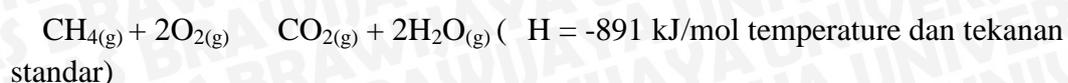
Metana adalah hidrokarbon paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH<sub>4</sub>. Metana merupakan gas yang terbentuk oleh adanya ikatan kovalen antara empat atom H dengan satu atom C. Sebagai komponen utama yang paling banyak terkandung pada gas alam, metana juga memiliki sifat yang mudah terbakar sehingga gas metana dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Gas metana menghasilkan karbon dioksida yang lebih sedikit atau lebih rendah dibandingkan hidrokarbon lainnya sehingga lebih ramah lingkungan.



Gambar 2.11 : Struktur Kimia Metana

Sumber : *Combustion Fourth Edition* (280: 2002)

Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO<sub>2</sub> (karbondioksida) dan dua molekul H<sub>2</sub>O (air). Reaksinya digambarkan pada persamaan kimia berikut.



Sekitar 891 kJ/mol, panas pembakaran gas metana lebih rendah daripada hidrokarbon lain tetapi rasio panas pembakaran (891 kJ / mol) dengan massa molekul (16,0 g / mol) menunjukkan bahwa gas metana, sebagai hidrokarbon yang paling sederhana, menghasilkan panas lebih banyak per satuan massa (55,7 kJ/g) dari hidrokarbon kompleks lainnya. Berikut adalah properti kimia dari gas metana.

Tabel 2.2 Properti Kimia Metana

Rumus Molekul	CH <sub>4</sub>
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa molar	16.04 kg/mol
Titik Didih	-296.5 °F (-182.5 °C) pada 1 atm
Titik Uap	-258.7 °F (-161.5 °C) pada 1 atm
Massa Jenis	0.7168 kg m <sup>-3</sup>
Titik Nyala	537 °C
Temperatur Pembakaran	1.952°C (kondisi stoikiometrik pada 25°C)

### 2.15 Perbandingan Udara dan Bahan Bakar

Perbandingan bahan bakar dan udara sangat berpengaruh pada proses pembakaran. Karena aspek terpenting dari pembakaran sendiri adalah bahan bakar dan udara. Jika pembakaran pada kondisi stoikiometri maka AFR ini disebut dengan AFR stoikiometri. Dengan mengetahui AFR dari suatu pembakaran maka kita dapat mengetahui berapa perbandingan antara bahan bakar yang tepat untuk suatu pembakaran. Dan diharapkan dapat terbentuk pembakaran yang mendekati sempurna. Karena pembakaran yang sempurna sangat sulit diterapkan karena pada pembakaran terdapat berbagai aspek yang sangat kompleks dan setidaknya kita dapat mendekati untuk pembakaran yang sempurna. Perbandingan bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam rumus 2.19 berikut

$$\text{AFR (air fuel ratio)} = \frac{m_u}{m_b}$$

(Wardana, 2008)(2.19)

 $m_u$  = massa udara $m_b$  = massa bahan bakar

### 2.15.1. Ekuivalen Rasio

Ekuivalen ratio merupakan suatu perbandingan AFR stoikiometri terhadap AFR aktual. di mana jika  $\phi > 1$  maka pembakaran kaya akan bahan bakar, jika  $\phi = 1$  maka pembakaran yang terjadi adalah pembakaran stoikiometri  $\phi < 1$  maka pembakaran miskin akan bahan bakar

$$\phi = \frac{A_a}{A_s}$$

(Wardana, 2008)(2.20)

 $A_a$  = AFR pada kondisi sebenarnya $A_s$  = AFR pada kondisi stoikiometri

### 2.16 PDF (*Probability Density Function*)

Merupakan suatu persamaan yang menyatakan perubahan densitas terhadap waktu. Karena pada kondisi aliran yang turbulen densitas akan berfluktuasi akibat dari perubahan arah aliran yang tidak beraturan. Sehingga untuk mengetahui perubahan densitas yang terjadi pada suatu pembakaran kita perlu mengetahui besar densitasnya. Karena pada pembakaran terdapat zona recirculation yang menyebabkan timbulnya aliran yang turbulen. Perubahan densitas dinyatakan pada rumus 2.21 berikut

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i$$

(Ansys.inc,1998)(2.21)

 $p(f)$  = perubahan densitas terhadap suatu fraksi dari fluida $\Delta f$  = perubahan fraksi $T$  = skala waktu $\tau_i$  = jumlah waktu yang digunakan merubah  $f$  menjadi  $\Delta f$ 

Setelah mengetahui  $p(f)$  kita dapat mencari besar scalar dari fraksi campuran yang bereaksi dari persamaan

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, H) p(f) df$$

(Ansys.inc,1998)(2.22)

$\bar{\phi}_i$  = fraksi campuran yang bereaksi

$\phi_i(f, H)$  = perubahan fraksi campuran terhadap entalpi

$p(f)$  = perubahan densitas

Hasil dari persamaan 2.22 akan digunakan untuk menentukan persamaan energi pada suatu pembakaran melalui nilai entalpi

### 2.17 Persamaan Energi

Untuk menyelesaikan persamaan energi pada pembakaran *non premixed*. Ansys Fluent menggunakan acuan total enthalpy yang didapatkan dari persamaan berikut

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_n$$

(Ansys.inc,1998)(2.23)

$H$  = total enthalpy

$\rho$  = densitas

$\vec{v}$  = kecepatan terhadap vektor

$S_n$  = enthalpy hasil reaksi kimia (enthalpy reaktan)

$k_t$  = konduktivitas termal turbulen

$c_p$  = panas spesifik

Di dalam termodinamika kita mempelajari energi panas. Dimana setiap unsur dalam suatu zat memiliki semacam energi potensial. Energi potensial yang terkandung dalam suatu zat tersebut yang dinyatakan sebagai enthalpy. Total enthalpy merupakan Selisih antara entalpi reaktan dan entalpi hasil pada suatu reaksi disebut perubahan entalpi reaksi dan Panas spesifik adalah jumlah panas yang digunakan untuk menaikkan 1 kg bahan sebesar 1 C

### 2.18 Hipotesis

Dengan menggunakan simulasi *swirl burner*, yang telah ditentukan kondisi-kondisi batasnya, maka semakin banyak *swirl* yang digunakan, aliran udara menjadi semakin turbulen saat kemiringan *swirl* bertambah, sehingga mixing bahan bakar akan lebih sempurna. Selain itu panjang api akan semakin pendek jika aliran semakin turbulen. Sehingga menyebabkan mixing antara bahan bakar dan udara semakin bagus pula



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode penelitian eksperimental semu, yaitu dengan studi literature untuk menemukan hubungan sebab akibat dari dalam suatu proses melalui pengumpulan data yang didapat dari berbagai sumber. Kemudian data-data tersebut diolah dengan menggunakan software ANSYS Fluent. Simulasi ini divalidasi dengan eksperimen yang sebelumnya dengan menggunakan data visualisasi nyala api pembakaran non premix dan visualisasi hasil dari fotoschliren untuk melihat densitas, kemudian data validasi ini digunakan untuk memprediksi simulasi pembakaran non premix dengan menggunakan bahan bakar metana.

### 3.2 Tempat dan Waktu Simulasi

Simulasi ini dilakukan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Maret - April 2016

### 3.3 Variabel Penelitian

#### 3.3.1 Variabel Bebas

Variabel Bebas adalah variable yang besarnya ditentukan sebelum penelitian. Pada penelitian ini variable bebasnya adalah

- laju kecepatan bahan bakar dan udara yaitu 3m/s, 5m/s, 7m/s dan
- variasi kemiringan sudut swirling vane  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$

#### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas. Pada penelitian ini variabel terikatnya adalah

- temperature
- kecepatan fluida
- densitas

### 3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrolnya adalah variable yang dibuat konstan. Pada penelitian ini yang menjadi variable terkontrolnya antara lain:

- Tekanan atmosfer ( $P_{atm}$ ) = 1 atm
- Temperature ruangan ( $T_{ruang}$ ) = 27°C
- Temperature udara ( $T_a$ ) = 27°C
- Temperature bahan bakar = 27°C
- Kandungan bahan bakar = 100%  $CH_4$
- Kandungan oksidator =  $O_2$  = 79% dan  $N_2$  = 21 %

### 3.4 Spesifikasi Komputer

- Processor : Intel (R) Core (TM) i5-240M CPU @ 2.50GHz (4CPUs), -2.5GHZ
- Memory : 8192MB RAM
- Display : NVIDIA GEFORCE GT 630M 2GB

### 3.5 Langkah – Langkah Simulasi

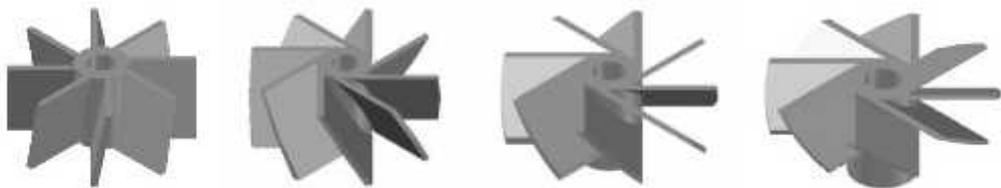
Langkah – langkah proses simulasi pada software ANSYS dibagi menjadi 3 tahap yaitu

1. Preprocessing
2. Processing
3. Postprocessing

#### 3.5.1 Preprocessing

##### 3.5.1.1 Penentuan Geometri Swirl

Tahap ini dilakukan pemodelan swirl burner. Desain swirl burner dapat kita lihat pada gambar 3. Dibawah ini

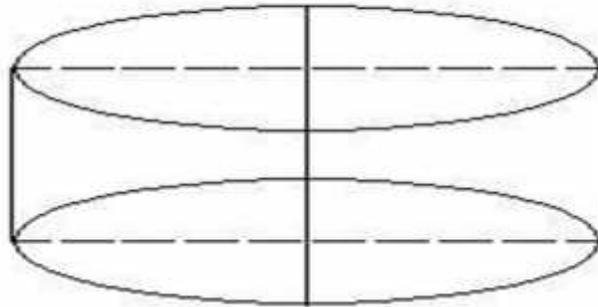


Gambar 3.1 Desain Swirl Burner

### 3.5.1.2 Menentukan Geometri

- **Simulasi 2D**

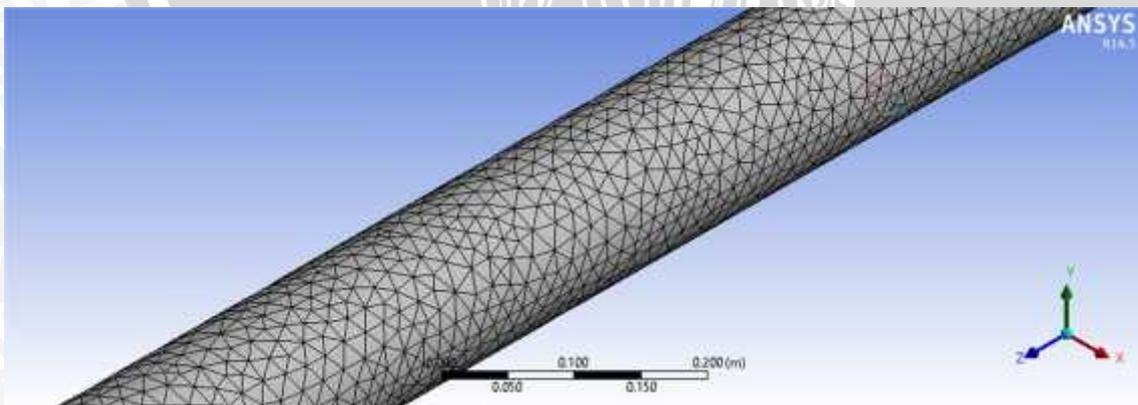
Permasalahan yang akan diselesaikan pada pembahasan skripsi ini akan ditinjau secara 2 dimensi dari proses pembakaran seperti pada gambar 3.2 berikut



Gambar 3.2 Asumsi 2D

### 3.5.1.3 Meshing

Meshing merupakan suatu proses pembagian komponen yang akan dianalisa menjadi beberapa elemen kecil. Dimana geometri nantinya menjadi suatu node-node yang digunakan sebagai perhitungan numeric. Node-node inilah yang nantinya digunakan untuk penyelesaian perhitungan sehingga kita dapat memetakan dalam bentuk simulasi. Semakin kecil elemen yang terbentuk maka persamaan yang diselesaikan oleh program juga semakin besar. Maka dari itu beban untuk computer juga semakin besar, tetapi hasil yang diperoleh juga semakin akurat, karena node-node perhitungannya juga semakin banyak. Meshing yang digunakan pada simulasi kali ini adalah 0.005. Dan bentuk meshing yang digunakan pada eksperiment semu kali ini dengan setting auto pada program ansys tersebut



Gambar 3.3 Meshing

### 3.5.2 Processing

Pada tahap ini kita melakukan :

1. Penentuan persamaan model yang akan digunakan
2. Memasukan kondisi batas dari permasalahan yang akan disimulasikan

#### 3.5.2.1 Persamaan Atur

Simulasi ini menggunakan persamaan atur sebagai berikut

- Persamaan Energi

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h$$

- Persamaan k-ε

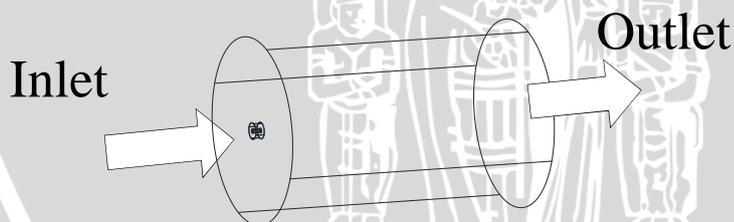
Persamaan turbulensi kinetik

$$\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x_i} = \tau_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right]$$

Persamaan disipasi

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_i \frac{\partial U_i}{\partial x} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

#### 3.5.2.2 Kondisi Awal (Initial Condition)



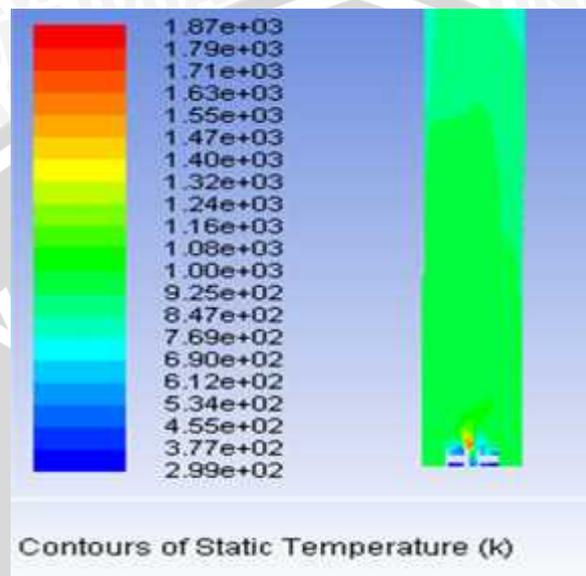
Gambar 3.4 Initial Condition

- Tekanan atmosfer (Patm) = 1 atm
- Temperature ruangan (Truang) = 27°C
- Temperature udara (Ta) = 27°C
- Kecepatan udara (Va) = 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s
- Kecepatan bahan bakar (Vb) = 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s
- Temperature bahan bakar = 27°C
- Kandungan bahan bakar = 100% CH<sub>4</sub>
- Kandungan oksidator = O<sub>2</sub> = 79% dan N<sub>2</sub> = 21 %

### 3.5.3 Postprocessing

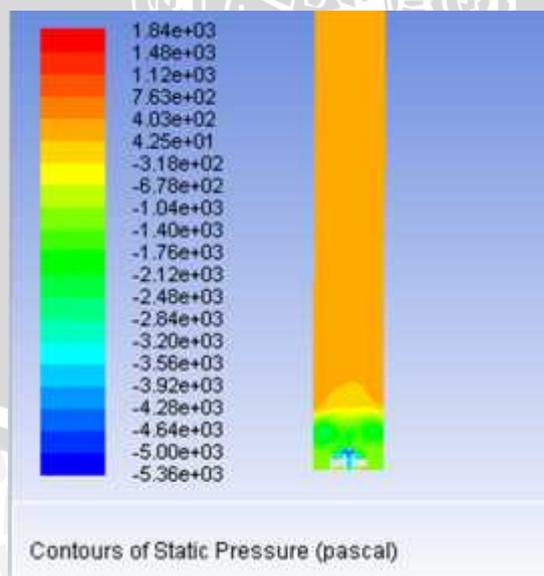
Pada postprocessing eksperimen kali ini kita akan menggunakan visualisasi dari hasil simulasi. Hasil visualisasi ini ditunjukkan untuk mengetahui bagaimana distribusi temperature, tekanan, dan kecepatan yang terjadi pada pemberian swirl burner

- Visualisasi temperature



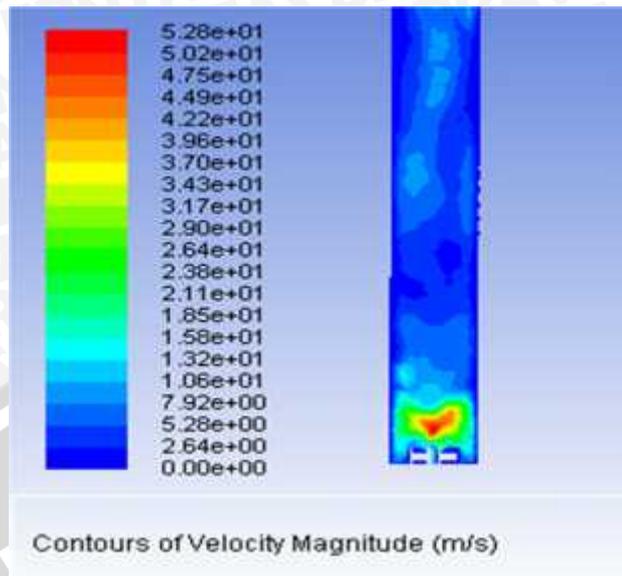
Gambar 3.5 visualisasi distribusi temperatur

- Visualisasi distribusi densitas



Gambar 3.6 Visualisasi distribusi tekanan

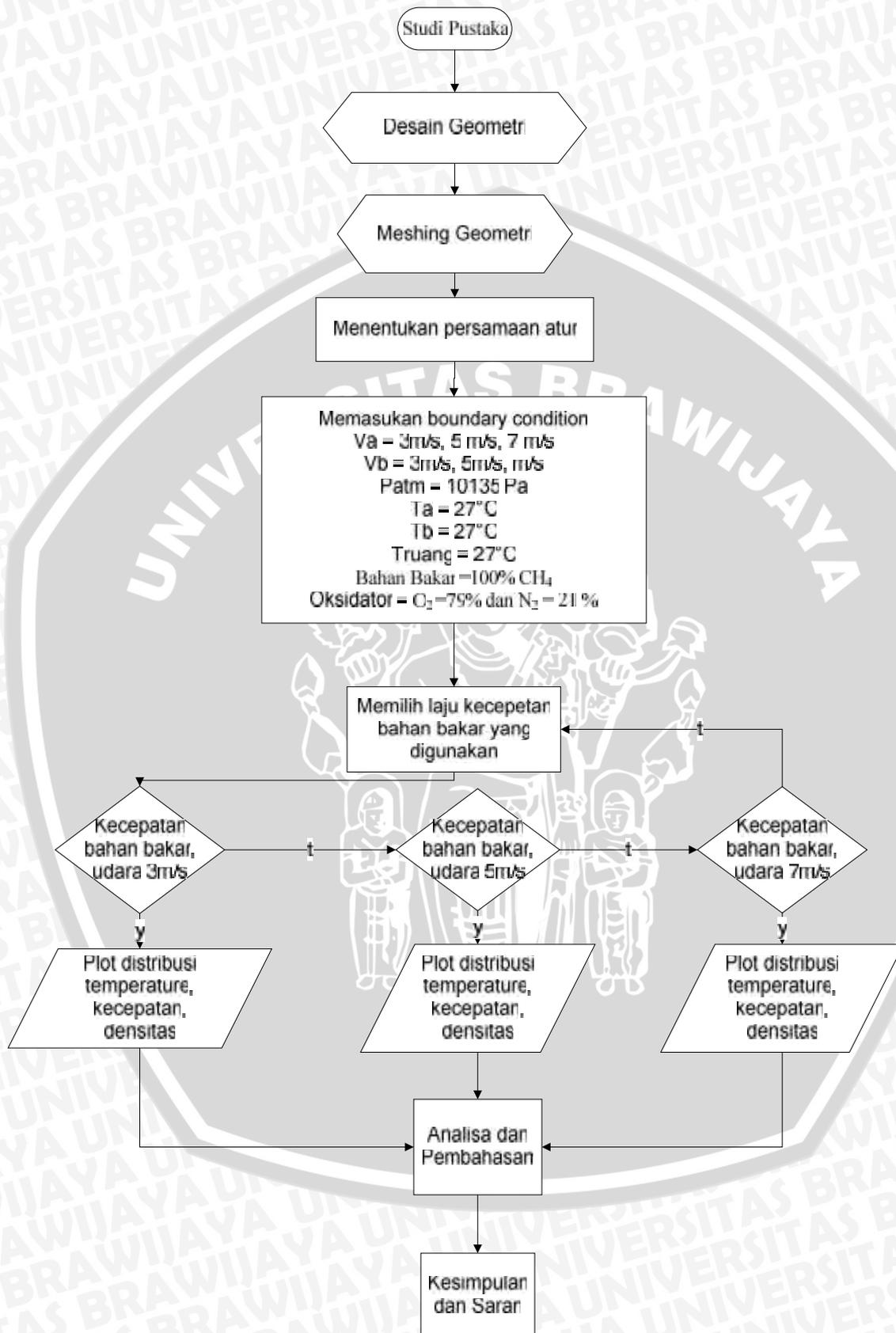
- Visualisasi distribusi kecepatan



Gambar 3.7 Visualisasi distribusi kecepatan



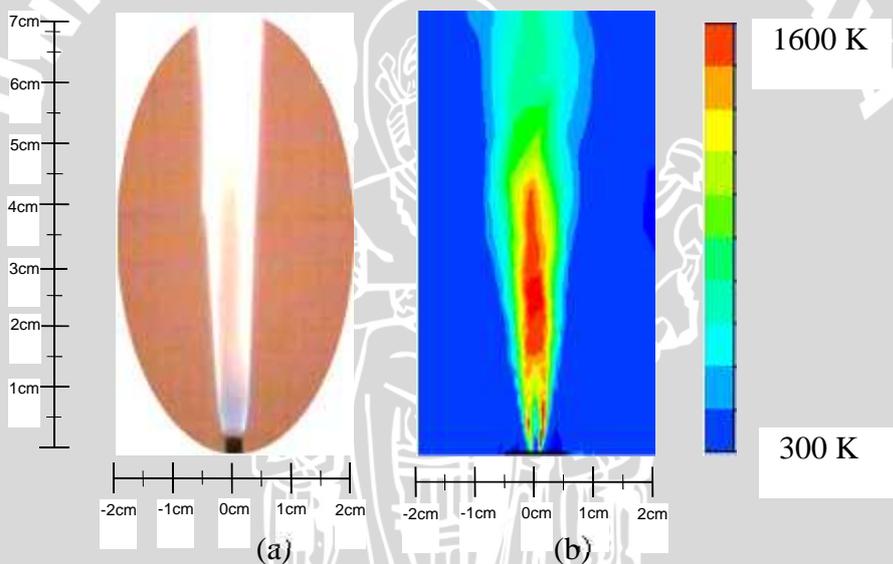
### 3.6 Diagram Alir Penelitian



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

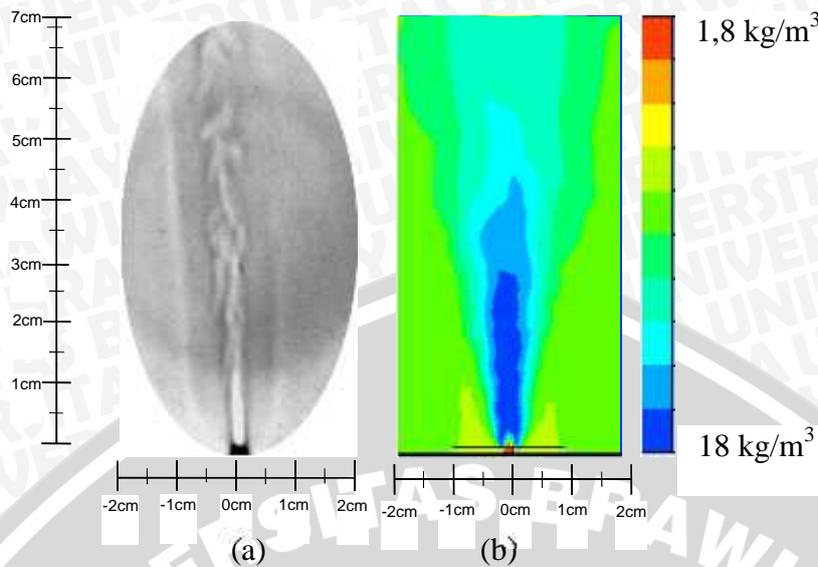
### 4.1 Validasi Eksperimen

Untuk mengetahui apakah hasil simulasi eksperimen semu yang kami lakukan benar, maka kita perlu melakukan *validasi* simulasi dengan hasil eksperimen yang sudah ada. Disini kami membandingkan bentuk kontur distribusi temperatur eksperimen semu kami dengan nyala api eksperimen yang dilakuakn oleh arief kurniawan. Gambar 4.1 dibawah ini merupakan gambar visualisasi api eksperimen nyata dan hasil simulasi berupa kontur distribusi temperatur



Gambar 4.1 Perbandingan visualisasi api dan distribusi temperatur (a) visualisasi api eksperimen nyata (b) visualisasi distribusi temperatur simulasi

Dari gambar 4.1 dapat dilihat visualisasi api dan simulasi distribusi temperature pada pembakaran *non premixed* tanpa *swirl* dengan kecepatan bahan udara 1.60123 m/s dan kecepatan bahan bakar 0.5784 m/s, Jadi dari visualisasi gambar 4.1 Terlihat kedua gambar bahwa kontur temperatur dan visualisasi api berbentuk melebar. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi yang digunakan sudah mendekati dengan eksperimen nyata. Sehingga simulasi ini dapat digunakan.



Gambar 4.2 Perbandingan distribusi kecepatan pada eksperimen nyata (a) foto *schliren* (b) kontur distribusi densitas

Dari gambar 4.2 dapat dilihat visualisasi densitas dengan foto *schliren* dan, kontur distribusi densitas pada pembakaran *non premixed* tanpa *swirl* dengan kecepatan bahan udara 1.60123 m/s dan kecepatan bahan bakar 0.5784 m/s, Jadi dari visualisasi gambar 4.2. Pada foto *schliren* daerah gelap menunjukkan bahwa densitas tinggi dan daerah terang menunjukkan bahwa densitas tinggi Terlihat kedua gambar bahwa kontur densitas dan visualisasi densitas foto *schliren* berbentuk melebar dan semakin keatas densitasnya semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi sudah mendekati dengan eksperimen nyata. Sehingga simulasi ini dapat digunakan

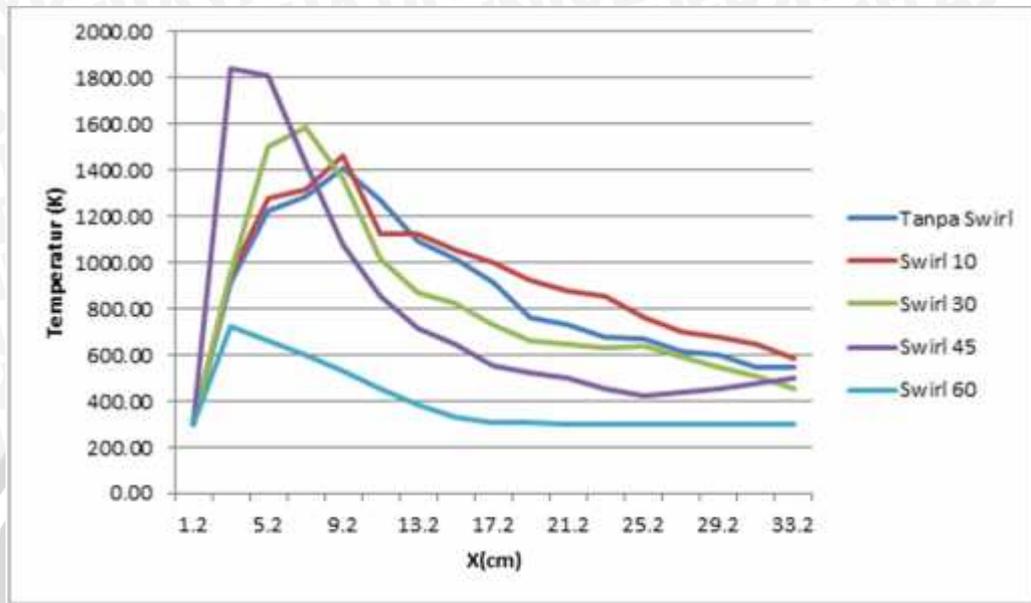
Perbedaan terjadi karena metode yang dilakukan tidak sama. Pada visualisasi eksperimen pengambilan gambar dilakukan dengan memfoto api secara langsung dan untuk visualisasi numerik tidak memperlihatkan bentuk api melainkan kontur dari distribusi densitasnya.

Hasil Eksperimen dan simulasi terdapat perbedaan bentuk. Hal ini dikarenakan pada eksperimen nyata terdapat banyak factor-faktor yang mempengaruhinya dan juga untuk besar skalanya tidak diketahui sehingga pada simulasi skala yang digunakan tidak sama dengan yang ada difoto *schliren*. Dan pada simulasi pembakaran dianggap ideal dan tidak ada gangguan dari lingkungan. Tetapi walaupun berbeda antara simulasi dan eksperimen nyata. Pada simulasi memiliki kemiripan yang signifikan pada bentuk dan konturnya

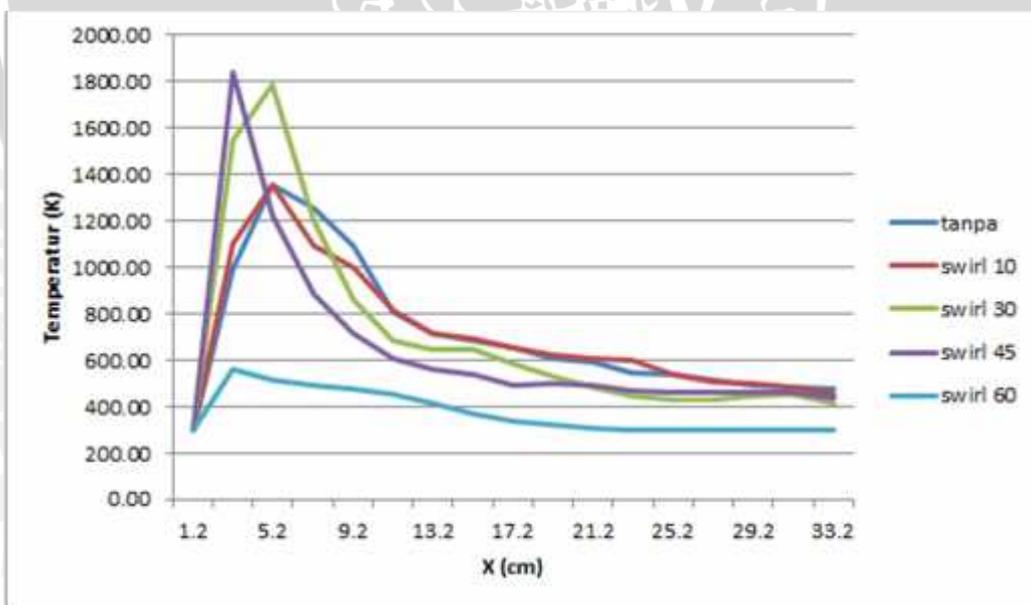
## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Distribusi Temperatur

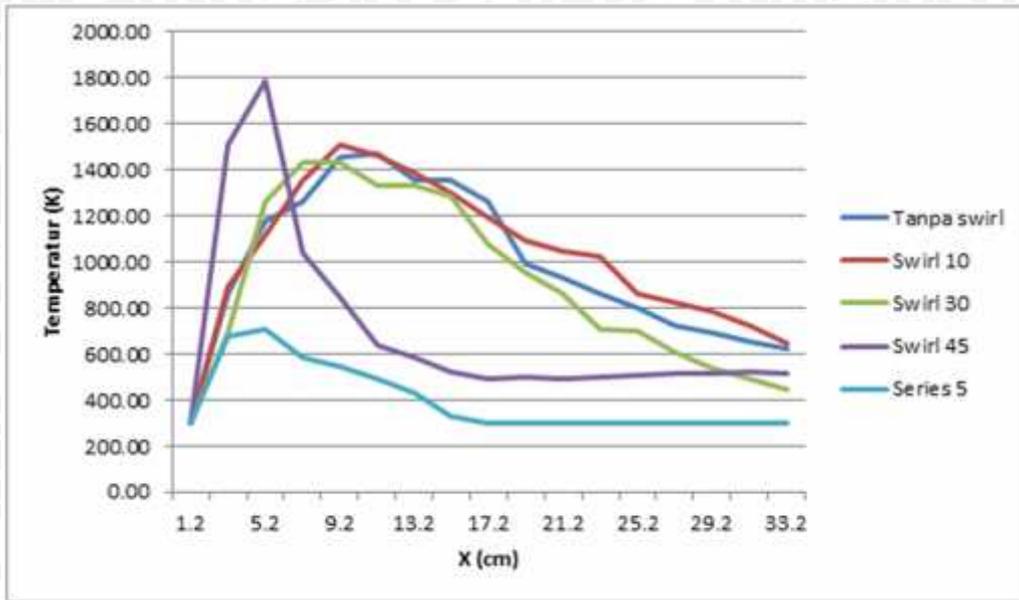
#### 4.2.1.1 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi *Swirl*



Gambar 4.3 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi *swirl* dan variasi kecepatan bahan bakar 3 m/s. dan kecepatan udara 5 m/s



Gambar 4.4 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi *swirl* dan variasi kecepatan bahan bakar 5 m/s. dan kecepatan udara 5 m/s



(c)

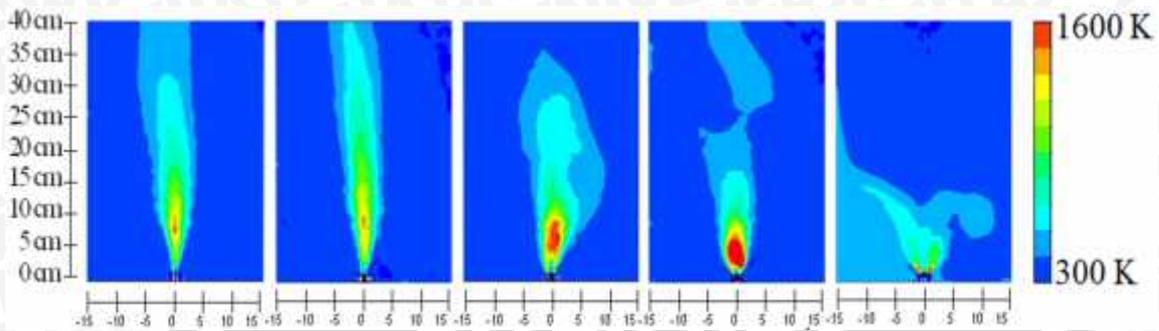
Gambar 4.5 Grafik temperatur terhadap jarak x pada variasi *swirl* dan variasi kecepatan bahan bakar 7m/s. dan kecepatan udara 5 m/s

Pada gambar 4.3 dan 4.4 kecepatan bahan bakar 3 m/s, 5 m/s terlihat grafik temperatur puncak tertinggi sampai yang paling rendah terdapat pada pemasangan *swirl* 45°, *swirl* 30°, *swirl* 10°, tanpa *swirl*, dan *swirl* 60°. Suhu puncak yang tertinggi terdapat pada pemasangan *swirl* 45°. Hal ini dikarenakan pada pemasangan *swirl* 45° aliran udara sangat turbulen sehingga *mixing* yang terjadi pada pemasangan *swirl* 45° semakin membaik juga. Tetapi pada pemasangan *swirl* 60° memiliki suhu puncak yang paling rendah. Hal ini dikarenakan pada pemasangan *swirl* 60° aliran terlalu turbulen sehingga terjadi *vortex* pada aliran udara. Karena itu *mixing* antara udara dan bahan bakar menjadi kurang maksimal.

Pada gambar 4.5 kecepatan bahan bakar 7 m/s terlihat pada grafik tidak puncak tertinggi sampai terendah terdapat pada pemasangan *swirl* 45°, *swirl* 10°, tanpa *swirl*, *swirl* 30°, dan *swirl* 60°. Pemasangan *swirl* 30° lebih rendah dari pada *burner* tanpa *swirl*, dan *swirl* 10°. Hal ini terjadi karena pada *swirl* 10° dan tanpa *swirl* aliran udara cenderung laminar dan pada *swirl* 30 aliran turbulen. Karena itu pada pemasangan *swirl* 10° dan tanpa *swirl* *mixing* yang terjadi belum optimal

Terlihat juga pada seluruh grafik bahwa semakin besar sudut kemiringan *swirl* menyebabkan suhu didekat mulut jet akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan adanya *swirl* menyebabkan udara akan semakin turbulen. Sehingga semakin besar sudut kemiringan dari *swirl* maka olakan dimulut jet semakin tinggi juga. Karena itu bahan bakar

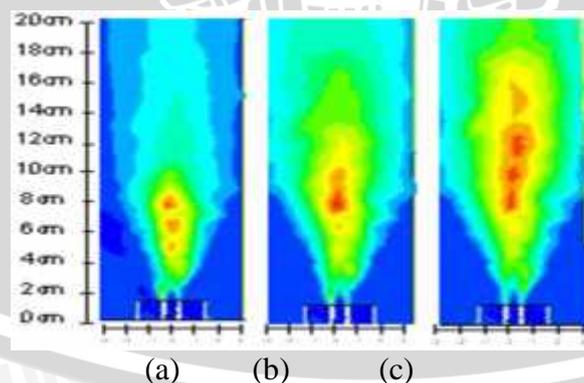
tidak dapat terbawa keatas. Sehingga api akan terdapat pada dekat mulut jet (blow out). dan pada aliran udara laminar bahan bakar akan terbawa keatas sehingga udara akan terbawa keatas yang menyebabkan api akan menjauhi mulut jet (lift off)



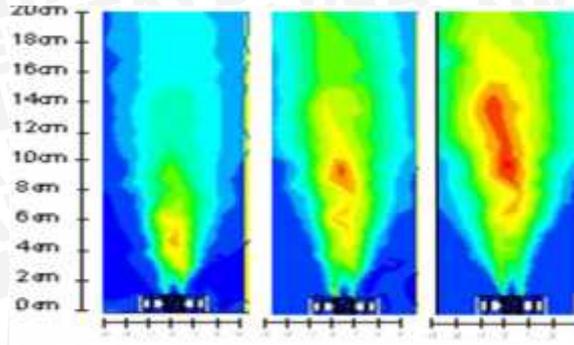
Gambar 4.6 Kontur distribusi temperatur pada variasi *swirl* dan kecepatan bahan bakar  
(a) 3 m/s (b) 5 m/s (c) 7m/s. dan kecepatan udara 5 m/s

Pada gambar 4.6 terlihat bahwa pemasangan *swirl* menyebabkan api akan semakin pendek. tetapi terlihat pada pemasangan *swirl* 10° api lebih panjang dari pada tanpa *swirl*. Hal ini dikarenakan pada pemasangan *swirl* 10° udara masih laminar tetapi udara sedikit terganggu sehingga walaupun laminar ada udara yang menjauhi mulut jet. Sehingga bahan bakar akan terbawa keatas. Sehingga menyebabkan api akan semakin panjang

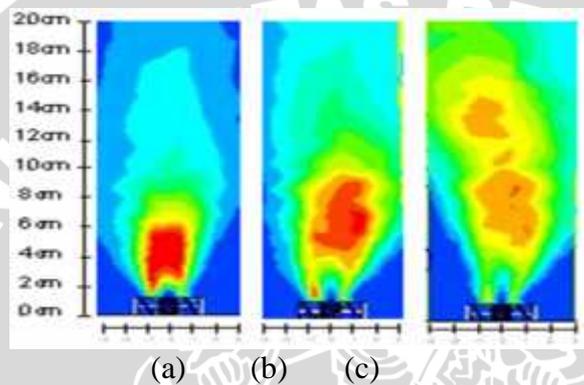
#### 4.2.1.2 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi Kecepatan Bahan Bakar



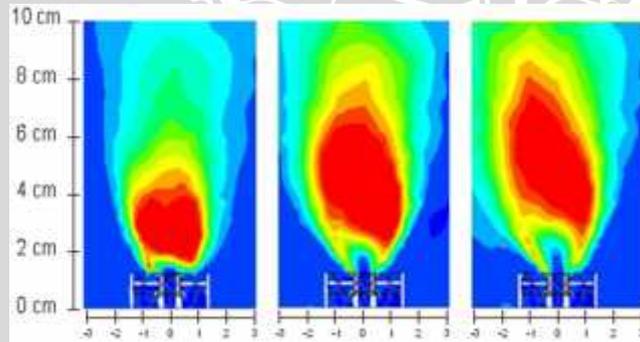
Gambar 4.7 (a) tanpa *swirl* kecepatan udara 3 m/s (b) tanpa *swirl* kecepatan udara 5m/s  
(c) tanpa *swirl*° kecepatan udara 7 m/s



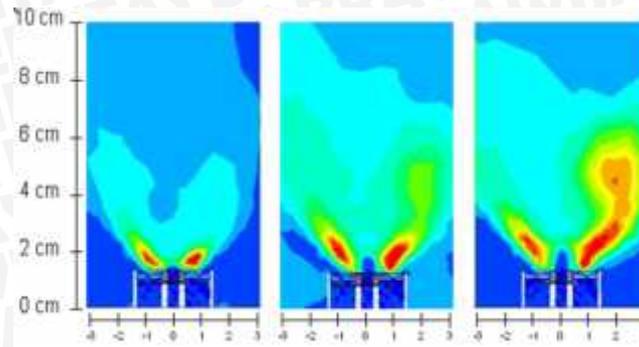
Gambar 4.8 (a) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 7 m/s



Gambar 4.9 (a) *swirl*  $30^\circ$  kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl*  $30^\circ$  kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl*  $30^\circ$  kecepatan udara 7 m/s

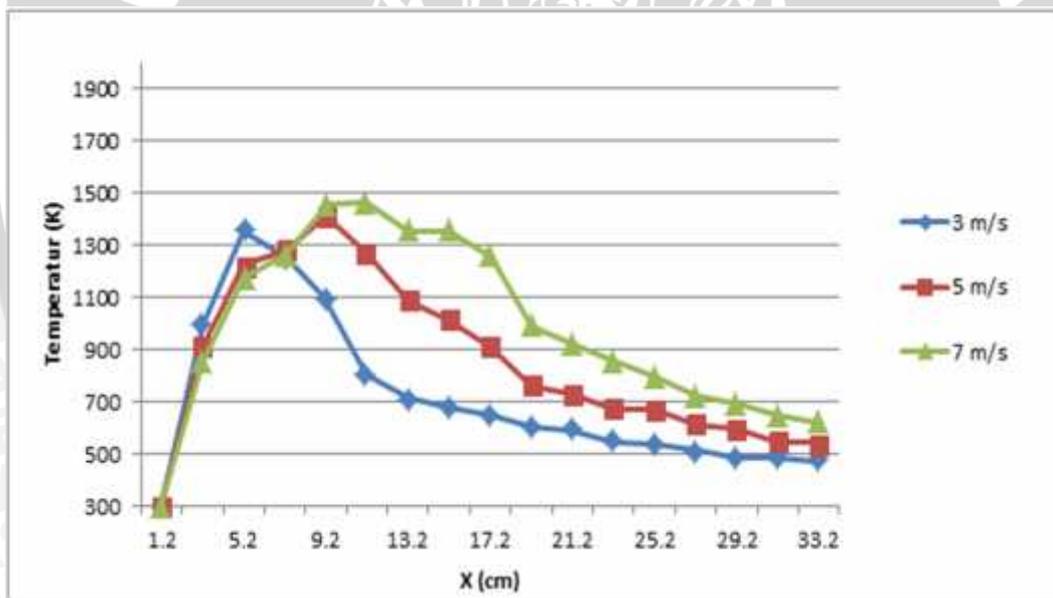


Gambar 4.10 (a) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 7 m/s

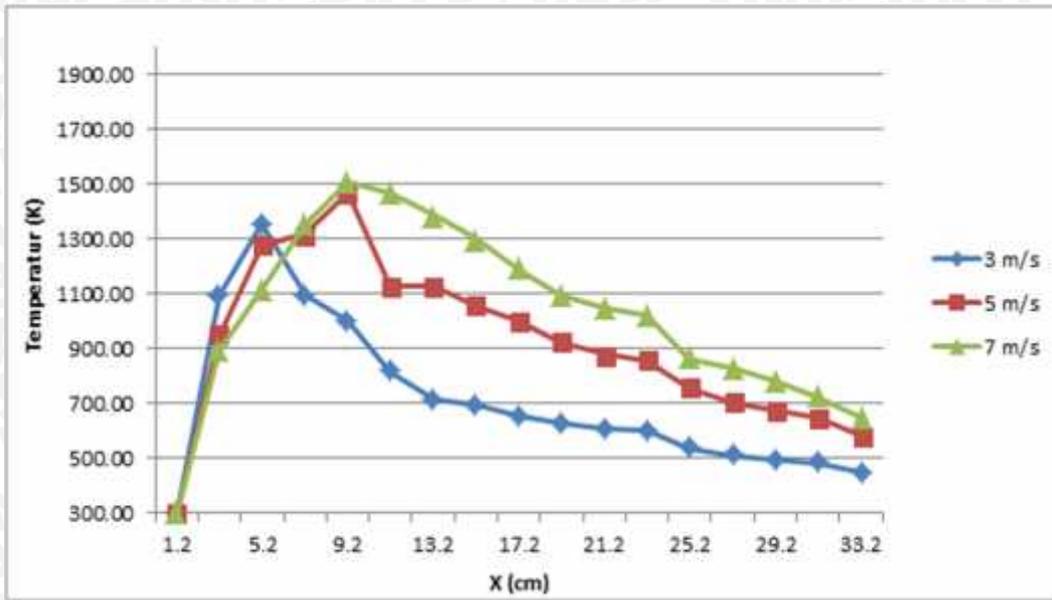


Gambar 4.11 (a) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 7 m/s

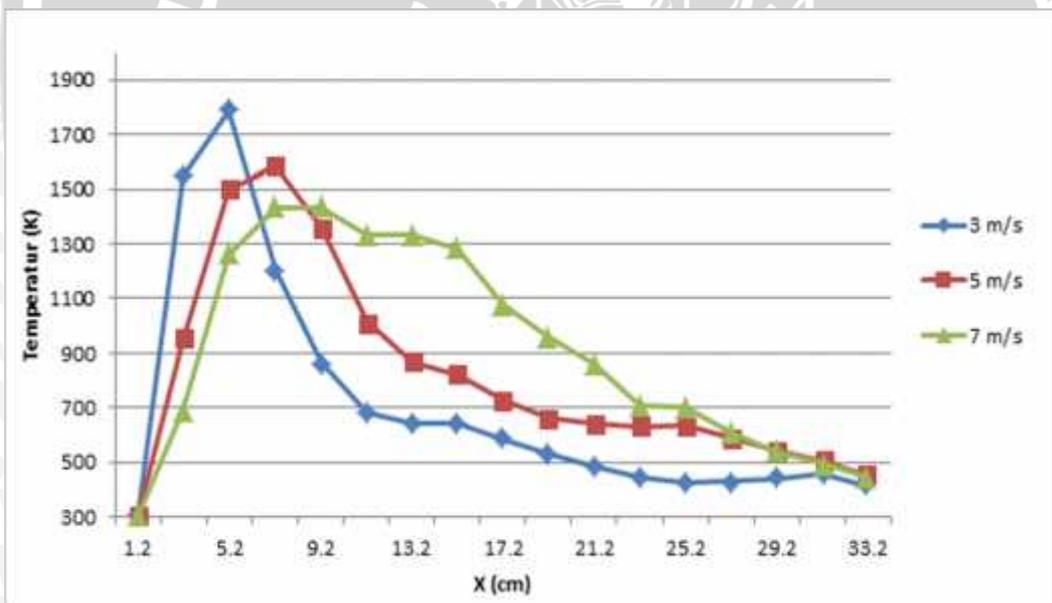
Pada gambar 4.7; 4.6; 4.8; 4.9; 4.10; 4.11 kontur distribusi temperatur terlihat semakin besar kecepatan bahan bakar maka api akan semakin panjang. Hal ini dikarenakan ketika kecepatan bahan bakar ditambahkan maka bahan bakar banyak yang terbawa keatas. Karena udara tidak mampu mensuply bahan bakar yang dikeluarkan



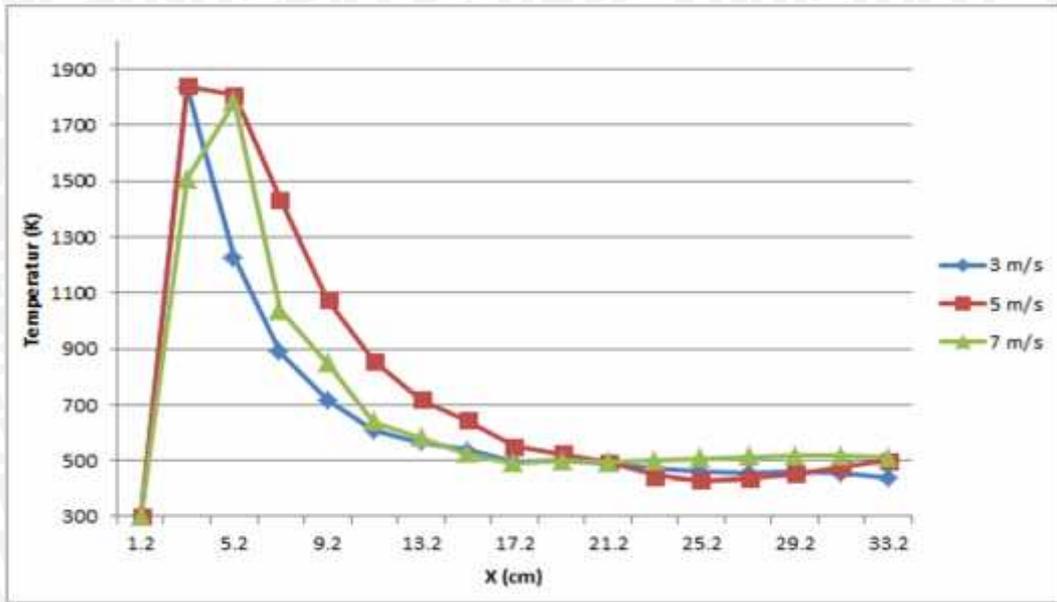
Gambar 4.12 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap swirl yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s tanpa swirl



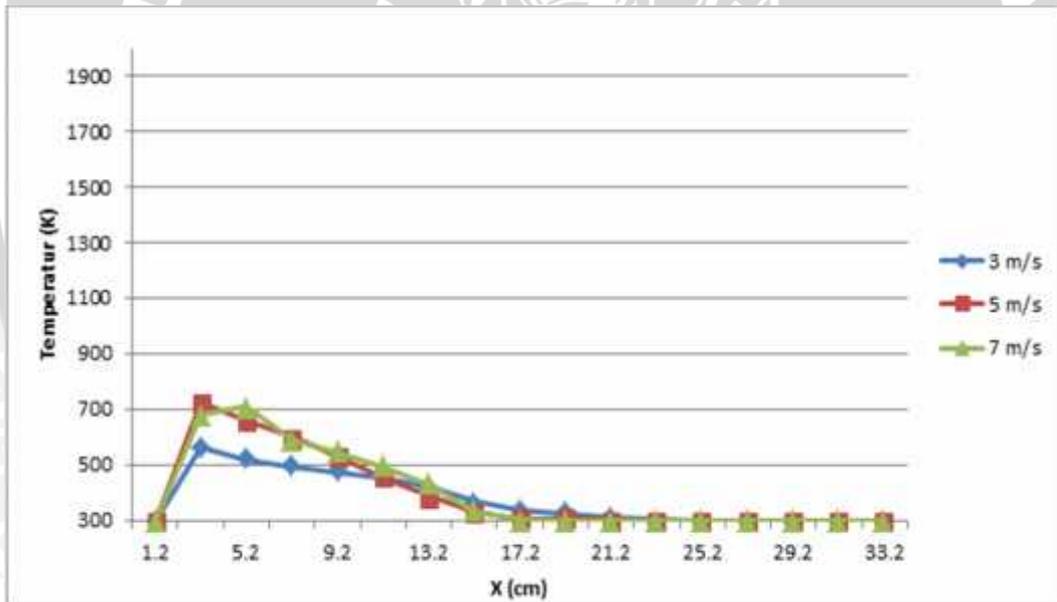
Gambar 4.13 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap swirl yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s swirl 10°



Gambar 4.14 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap swirl yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s swirl 30°



Gambar 4.15 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap swirl yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s swirl 45°



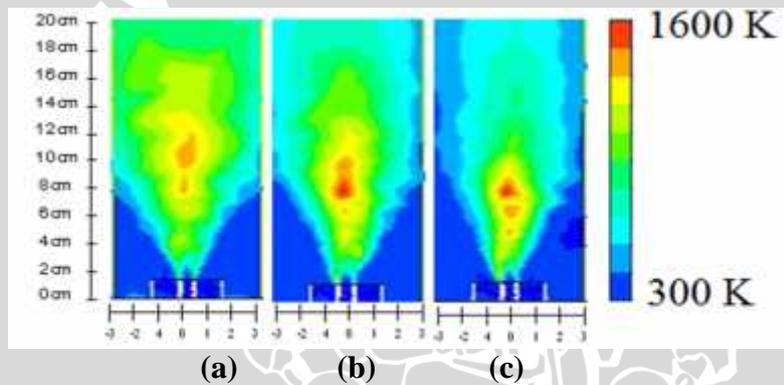
Gambar 4.16 Grafik perbandingan kecepatan bahan bakar terhadap swirl yang sama dan kecepatan bahan bakar sama 5 m/s swirl 60°

Pada gambar 4.12; 4.16 terlihat bahwa pada *burner* tanpa *swirl* dan dengan pemasangan *swirl* 60° suhu tertinggi terlihat pada kecepatan bahan bakar 5m/s. Hal ini dikarenakan pada pemasangan tanpa *swirl* pencampuran yang optimal terjadi pada kecepatan bahan bakar 5 m/s, dan pada kecepatan 7 m/s suhu puncaknya menurun dikarenakan pada kecepatan 7m/s api menjadi kekurangan udara

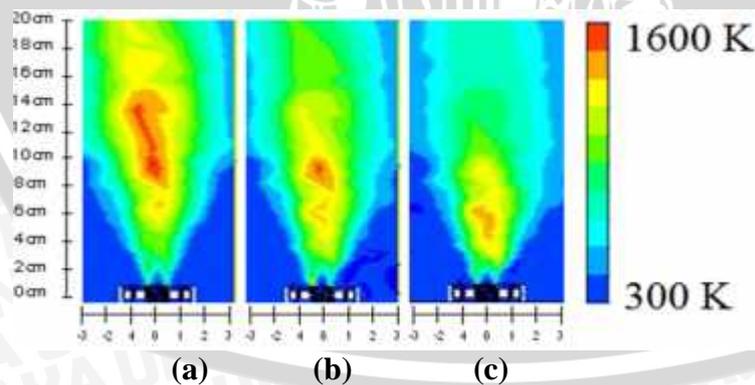
Pada gambar 4.13 tampak pada *burner* dengan pemasangan *swirl*  $10^\circ$  suhu terus bertambah seiring bertambahnya kecepatan bahan bakar. Hal ini dikarenakan pada *burner* dengan pemasangan *swirl*  $10^\circ$  percampuran belum optimal sehingga suhu puncaknya semakin bertambah ketika suply bahan bakarnya terus ditambah

Pada gambar 4.14; 4.15 *swirl*  $30^\circ$  dan *swirl*  $45^\circ$  suhu puncak semakin menurun ketika suply bahan bakarnya ditambah. Hal ini terjadi karena pada pemasangan *swirl*  $30^\circ$  dan *swirl*  $45^\circ$  percampuran sudah optimal sehingga ketika bahan bakar ditambahkan maka suhunya akan semakin menurun dikarenakan bahan bakar menjadi banyak yang terbawa keatas

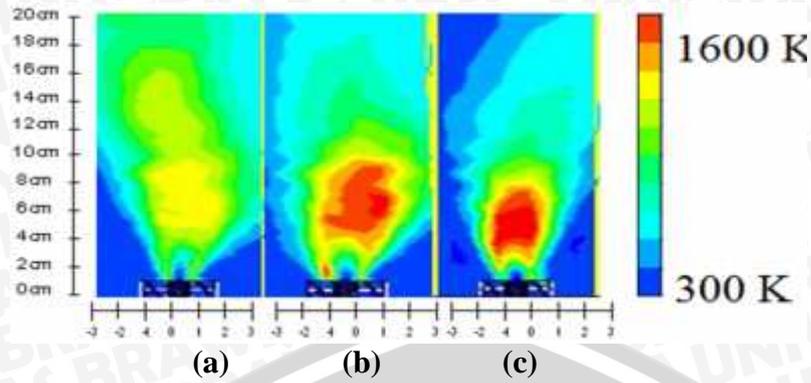
#### 4.2.1.3 Pengaruh Kontur Distribusi Temperatur Terhadap Variasi Kecepatan Udara



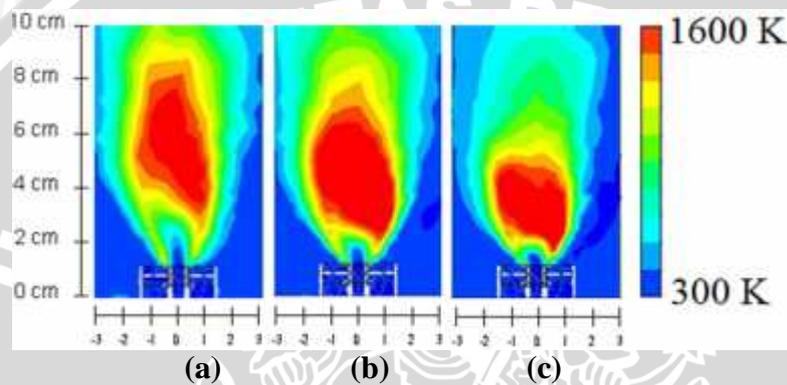
Gambar 4.17 (a) tanpa *swirl* kecepatan udara 3 m/s (b) tanpa *swirl* kecepatan udara 5 m/s (c) tanpa *swirl* kecepatan udara 7 m/s



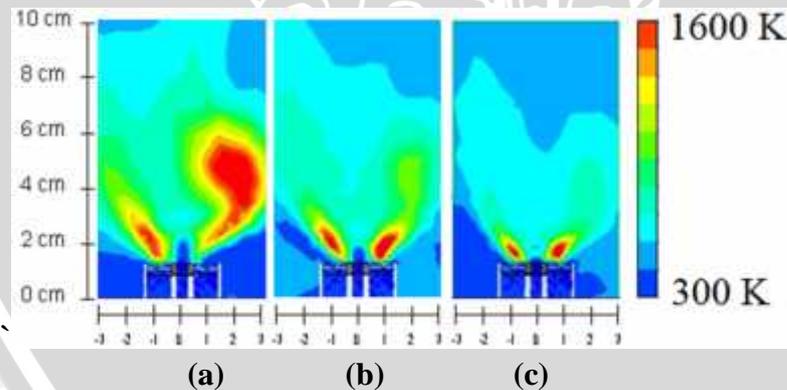
Gambar 4.18 (a) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 5 m/s (c) *swirl*  $10^\circ$  kecepatan udara 7 m/s



Gambar 4.19 (a) *swirl* 30° kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl* 30° kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl* 30° kecepatan udara 7 m/s

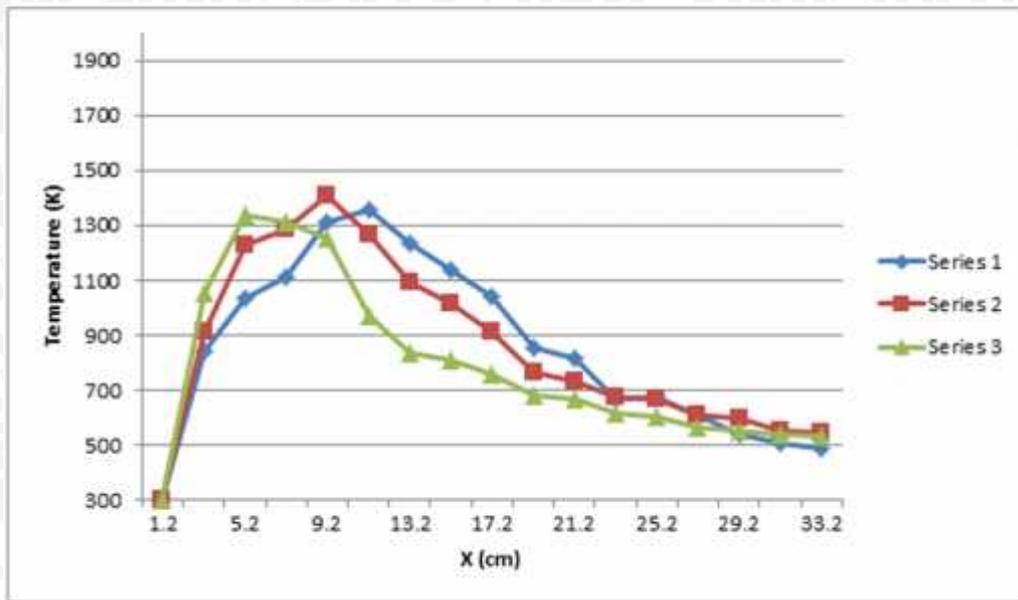


Gambar 4.20 (a) *swirl* 45° kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl* 45° kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl* 45° kecepatan udara 7 m/s

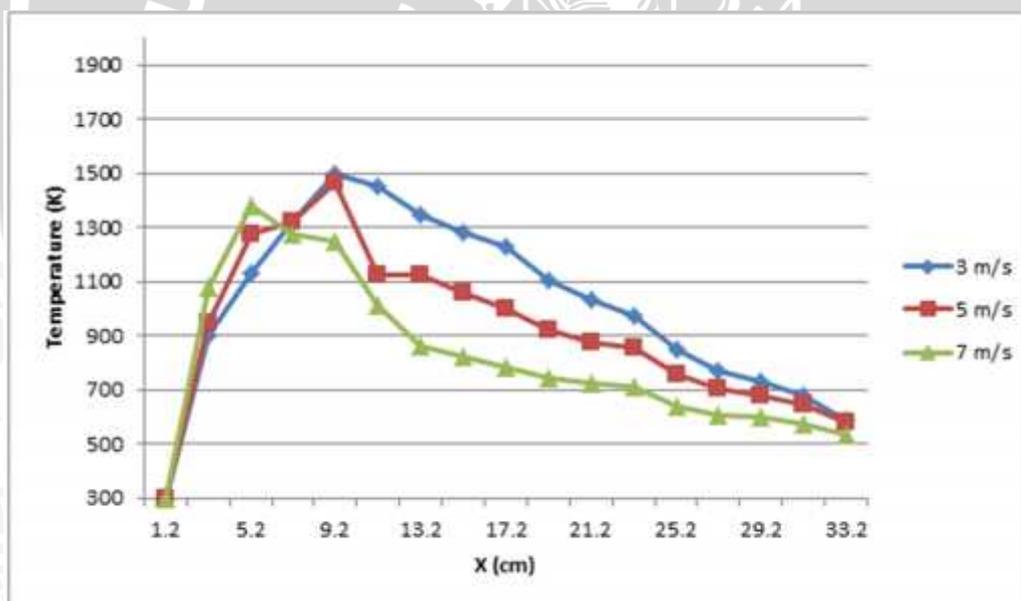


Gambar 4.21 (a) *swirl* 60° kecepatan udara 3 m/s (b) *swirl* 60° kecepatan udara 5 m/s  
(c) *swirl* 60° kecepatan udara 7 m/s

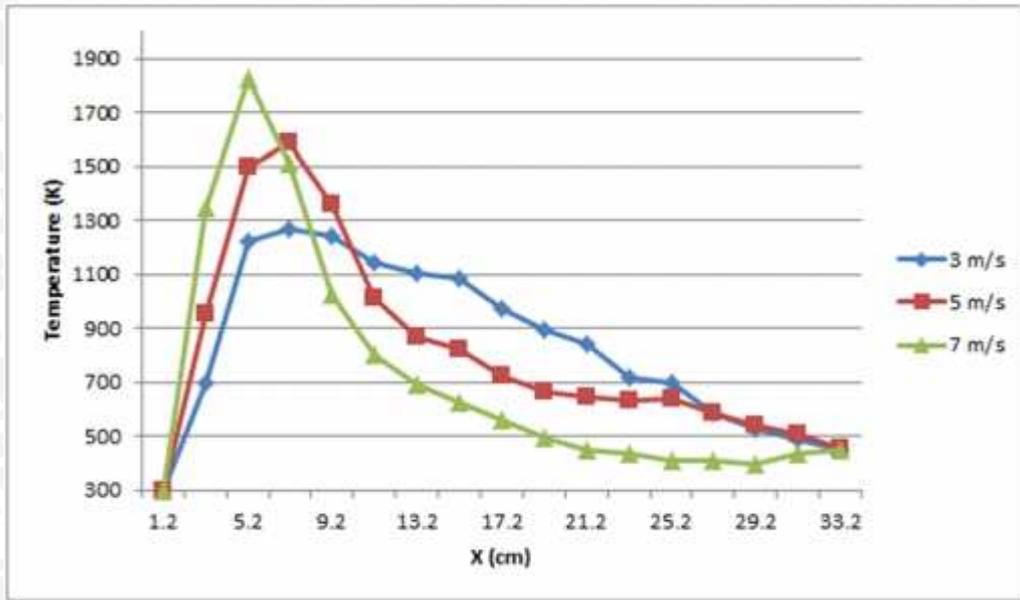
Pada gambar 4.17; 4.18; 4.19; 4.20; 4.21 kontur distribusi temperatur terlihat semakin besar kecepatan udara maka api akan semakin pendek. Hal ini dikarenakan ketika kecepatan udara ditambahkan maka bahan bakar akan terbakar sebelum terbawa keatas.



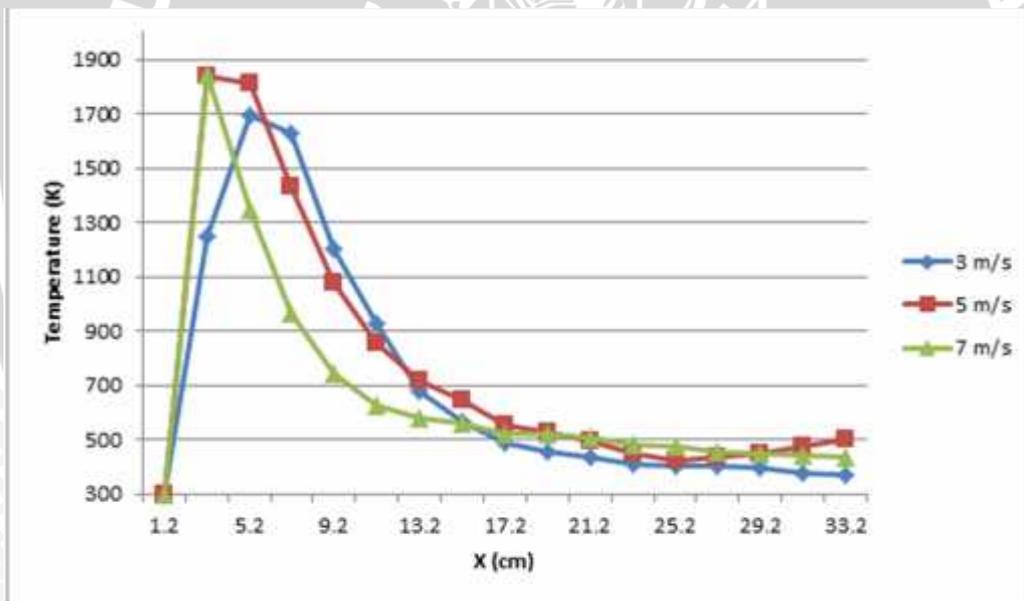
Gambar 4.22 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s tanpa swirl



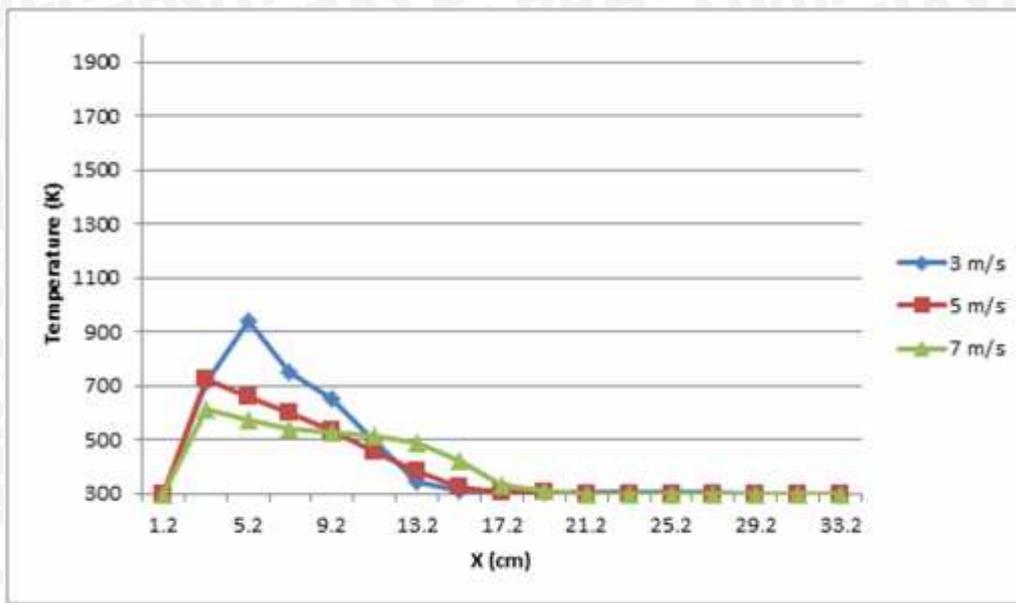
Gambar 4.23 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s) swirl 10°



Gambar 4.24 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 30°



Gambar 4.25 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl 45°



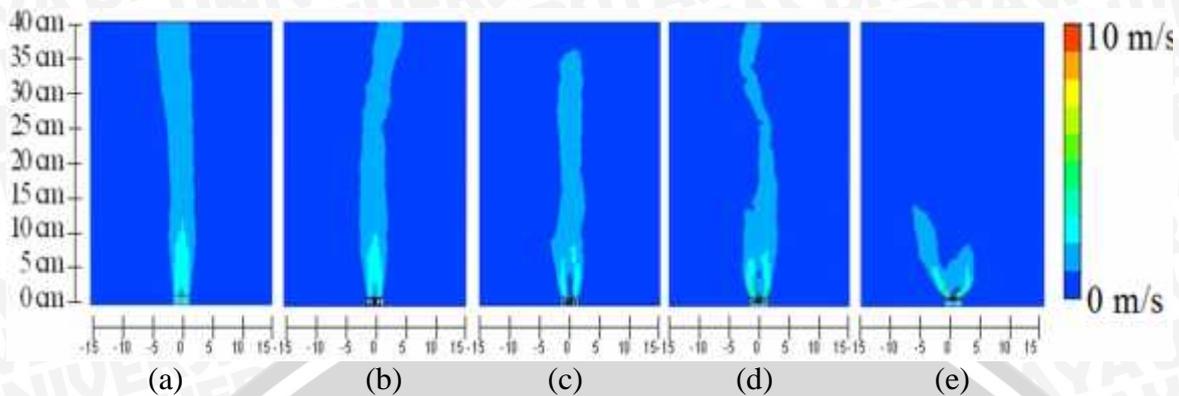
Gambar 4.26 Grafik perbandingan kecepatan udara terhadap swirl yang sama dan kecepatan udara sama 5 m/s swirl  $60^\circ$

Pada gambar 4.22 terlihat bahwa pada *burner* tanpa *swirl* suhu tertinggi terlihat pada kecepatan udara 5 m/s. Hal ini dikarenakan pada *burner* tanpa *swirl* pencampuran yang paling optimal terjadi pada kecepatan udara 5 m/s. Dan pada kecepatan 7 m/s suhu puncaknya menurun, dikarenakan pada *burner* tanpa *swirl* aliran udara cenderung laminar sehingga udara tidak bercampur melainkan menjadi pelindung

Pada gambar 4.23; 4.26 *burner* dengan *swirl*  $10^\circ$  dan *swirl*  $60^\circ$  suhu puncak semakin menurun ketika suply udara ditambahkan. Hal ini dikarenakan pada pemasangan *swirl*  $10^\circ$  udara menjadi bercampur dengan baik dimungkinkan karena adanya udara yang terlempar menjauhi api. Dan pada pemasangan *swirl*  $60^\circ$  semakin menurun, dikarenakan pada pemasangan *swirl*  $60^\circ$  aliran udara membentuk *vortex* sehingga ketika aliran udara semakin ditambahkan maka aliran akan membentuk *vortex* yang semakin besar

Pada gambar 4.24; 4.25 *burner* dengan pemasangan *swirl*  $30^\circ$  dan *swirl*  $45^\circ$  suhu puncaknya semakin tinggi ketika suply udara ditambahkan. Hal ini dikarenakan pada pemasangan *swirl*  $30^\circ$  dan *swirl*  $45^\circ$  pencampuran bahan bakarnya sudah optimal. Sehingga ketika suply udara ditambahkan, maka bahan bakar akan semakin banyak yang bercampur dengan udara. Hal ini dikarenakan intensitas turbulensi pada pemasangan *swirl*  $30^\circ$  dan *swirl*  $45^\circ$  besar dan menyebabkan zona *recirculation* juga semakin besar.

#### 4.2.2 Distribusi Kecepatan



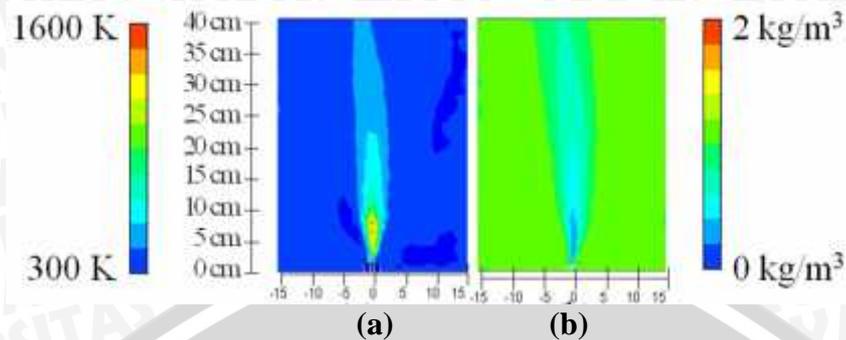
Gambar 4.27 Kontur distribusi kecepatan (a) tanpa *swirl* (b) *swirl* 10° (c) *swirl* 30° (d) *swirl* 45° (e) *swirl* 60°

Pada gambar 4.17 merupakan gambar kontur distribusi kecepatan pada jet. Terlihat bahwa pada *burner* tanpa *swirl* dan pemasangan *swirl* 10° terlihat distribusi kecepatan berbentuk laminar. Tetapi terlihat pula pada ujung distribusi kecepatan pada *swirl* 10° pada ujung sedikit terganggu. Hal ini dikarenakan pada *swirl* 10° aliran dari oksidator lebih turbulen. Sehingga aliran menjadi tidak stabil

Selanjutnya pada gambar 4.17 pada pemasangan *swirl* 30° dan seterusnya aliran oksidator mulai memecah hal ini disebabkan karena mulai dari *swirl* 30° aliran membentuk *vortex* dikarenakan aliran menumbuk bilah pemusar yang kemiringannya lebih ekstrim dan menyebabkan udara akan semakin terlempar menjauhi mulut jet. Lalu karena adanya tumbukan antara partikel-partikel udara maka udara bergerak tidak teratur. Sehingga aliran fluida tampak memecah. Fenomena ini terjadi karena semakin tinggi sudut kemiringan *swirl burner* maka hambatan yang diberikan pada aliran fluida juga semakin tinggi. Akibatnya bilangan Reynold juga semakin tinggi karena nilai bilangan Reynold sebanding dengan kecepatan dan hambatan.

terjadinya *vortex* bukan fenomena yang merugikan. karena semakin besar *vortex* yang terjadi maka intensitas turbulensi yang dihasilkan akan semakin besar. Sehingga pencampuran antara bahan bakar dan udara akan semakin baik. Tetapi jika *vortex* ini terlalu besar maka mixing bahan bakar akan menurun. Hal ini dikarenakan udara akan menjauhi mulut nosel sehingga udara tidak dapat bertemu dengan bahan bakar dan dapat menyebabkan api mudah *blow out* (padam)

### 4.2.3 Distribusi Densitas



Gambar 4.28 Perbandingan kontur distribusi temperatur dengan distribusi densitas (a) distribusi temperatur (b) distribusi densitas

Pada gambar 4.18 menunjukkan kontur distribusi densitas pada ruang bakar dengan  $plane x=0; -0.3 \leq y \leq 0.3; 0 \leq z \leq 0.4$ . Pada gambar 4.18 terlihat bahwa pada temperatur yang tinggi maka densitasnya rendah. Hal ini terjadi karena pada temperatur tinggi maka partikel-partikel akan bergetar. Sehingga molekul-molekul tersebut mulai berpencar sehingga menyebabkan pada temperatur tinggi akan menyebabkan densitas semakin mengecil. Hal ini sesuai dengan persamaan gas ideal. Hal ini sesuai dengan persamaan gas ideal. Dimana nilai volume sebanding dengan temperature dan nilai densitas berbanding terbalik dengan nilai volume. Sehingga semakin besar temperatur, volume juga semakin meningkat dan menyebabkan densitas semakin kecil

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penilitan kami adalah sebagai berikut

1. Semakin besar sudut kemiringan *swirl* menyebabkan api akan semakin pendek
2. Api memanjang pada saat penambahan *swirl*  $10^\circ$  karena aliran dari udara akan melebar menjauhi jet sehingga api menjadi lebih tinggi.
3. Aliran udara terjadi *vortex* pada pemasangan *swirl* diatas  $10^\circ$
4. Semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka api akan semakin tinggi
5. Semakin tinggi kecepatan udara (oksidator) menyebabkan api semakin pendek
6. Semakin tinggi kecepatan udara, api akan panas pada titik optimumnya
7. Pada suhu tinggi densitas fluida akan semakin rendah
8. Suhu tertinggi didapat pada pemasangan *swirl*  $45^\circ$
9. Suhu terendah didapat pada pemasangan *swirl*  $60^\circ$
10. Semakin tinggi kecepatan fluida maka api akan semakin pendek
11. Semakin besar sudut kemiringan *swirl* maka api akan semakin mendekati mulut jet

### 5.2 Saran

1. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya digunakan meshing yang lebih kecil agar didapatkan hasil yang lebih akurat
2. Untuk Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memvariasi kecepatan bahan bakar dan udara yang lebih detail. Sehingga kita dapat lebih mengetahui fenomenafenomena yang terjadi pada pembakaran dengan pemasangan *swirl burner*
3. Untuk kedepanya sebaiknya penelitian menggunakan simulasi dengan persamaan turbulensi yang lainnya. Sehingga kita dapat mengetahui persamaan turbulensi apa yang paling mendekati aktual

## DAFTAR PUSTAKA

- Chomiak, Jerzy, 1990. *Combustion A Study in Theory, Fact and Application, Energy and Engineering Science Series*, New York : Gordon and Breach Science
- Echekki, Tarek., Mastorakos, Epaminondas, 2011. *Turbulent Combustion Modeling, Fluid Mechanics and Its Applications*, Springer Science & Business Media B.V
- El-Mahallawy, Fawzy., El-Din Habik, Saad, 2002. *Fundamentals And Technology Of Combustion*, United Kingdom: Elsevier
- Holman, J.P., 1985. *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga
- Kuo, Kenneth K, 1986. *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W. 1975, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure.", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 68(3), pp. 537-566.
- Peters, Norbert, 2010. *Combustion Theory*, CEFRC Summer School, Germany : Aachen University
- R. Munson, Bruce., F. Young, Donald., H. Okiishi, Theodore, 2005. *Mekanika Fluida Edisi Keempat*, Jakarta: Erlangga
- Rohmat, Tri Agung., Sahrudin, Rahmat., Saptoadi Harwin., 2010. *Pengaruh Swirl Vanes Pada Aliran Udara Sekunder Terhadap Api Difusi Yang Terbentuk Di Aliran Sembur Double Concentric*, Palembang: Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, Lembaga Penelitian Mechanical and Industrial Engineering Dept. Universitas Gadjah Mada
- Versteeg, HK, W Malalasekera, 1995. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", John Willey and Sons Inc
- Wardana, I. N. G. 2008, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Wilcox, David C 1998. "Turbulence Modeling for CFD". Second edition. Anaheim: DCW Industries



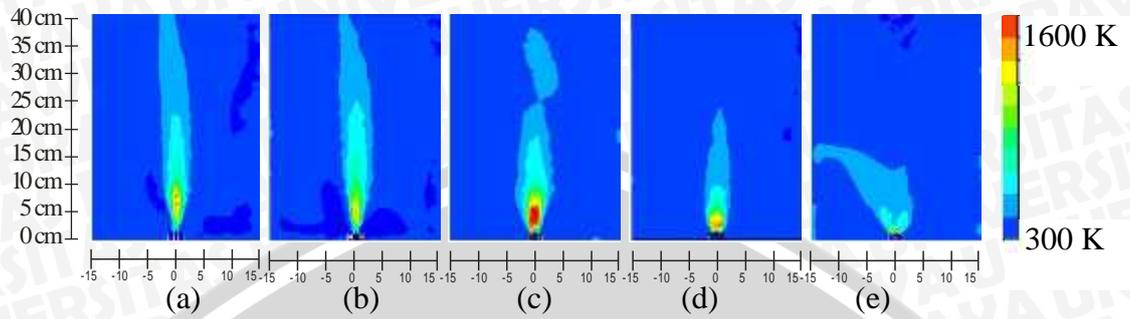
# LAMPIRAN



## LAMPIRAN HASIL VISUALISASI SIMULASI

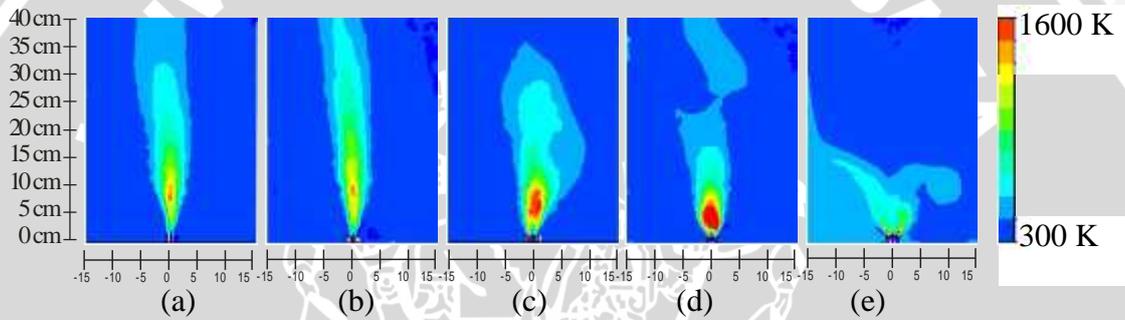
### • Variasi Bahan Bakar

3 m/s



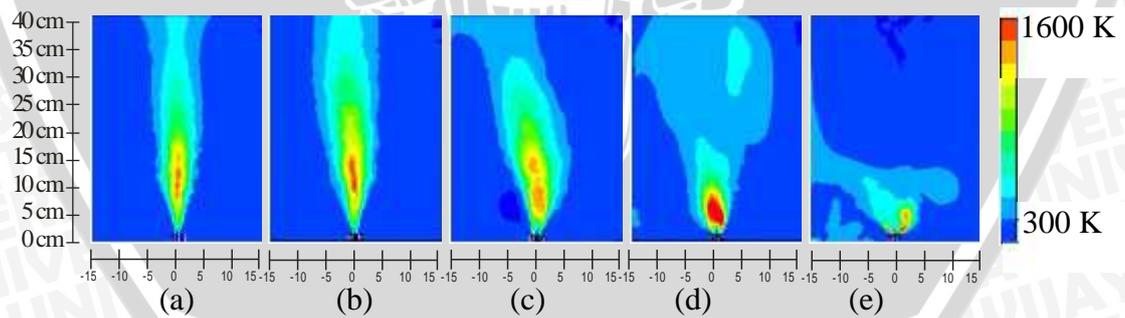
(a) tanpa swirl (b) swirl  $10^\circ$  (c) swirl  $30^\circ$  (d) swirl  $45^\circ$  (swirl)  $60^\circ$

5m/s



(a) tanpa swirl (b) swirl  $10^\circ$  (c) swirl  $30^\circ$  (d) swirl  $45^\circ$  (swirl)  $60^\circ$

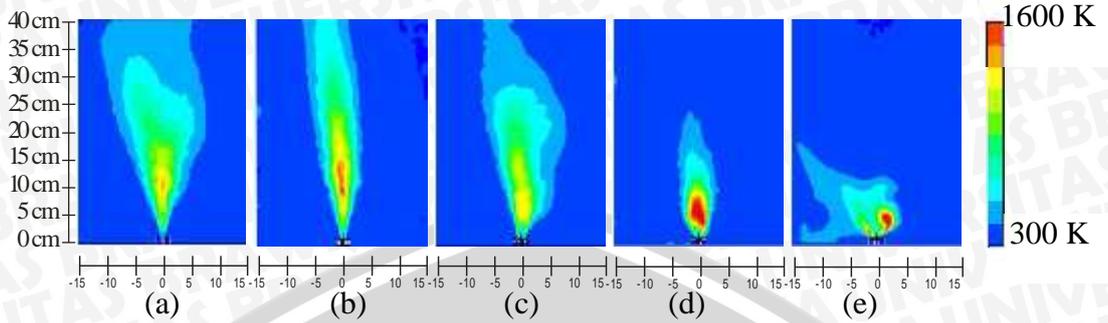
7m/s



(a) tanpa swirl (b) swirl  $10^\circ$  (c) swirl  $30^\circ$  (d) swirl  $45^\circ$  (swirl)  $60^\circ$

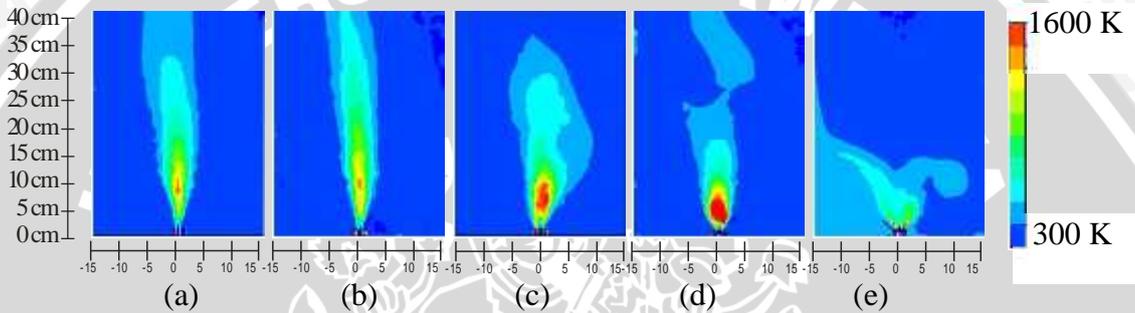
• Variasi Kecepatan Udara

3m/s



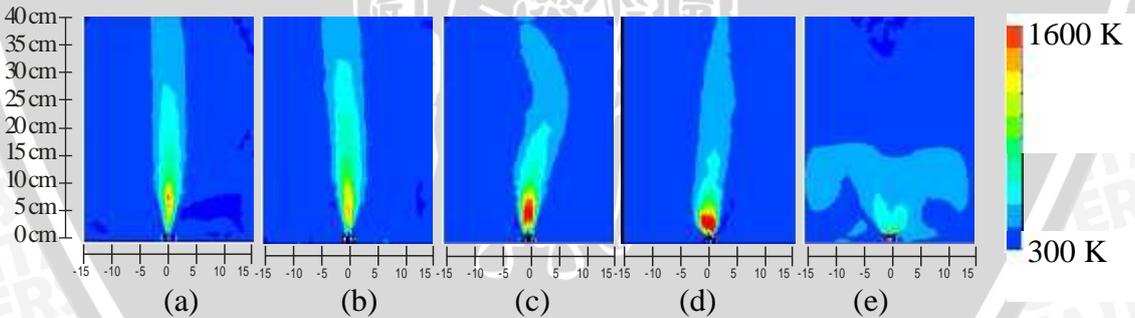
(a) tanpa swirl (b) swirl 10° (c) swirl 30° (d) swirl 45° (swirl) 60°

5m/s



(a) tanpa swirl (b) swirl 10° (c) swirl 30° (d) swirl 45° (swirl) 60°

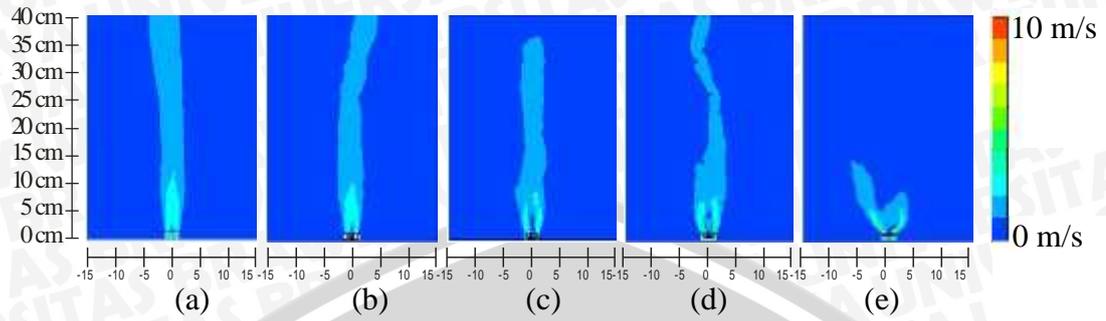
7m/s



(a) tanpa swirl (b) swirl 10° (c) swirl 30° (d) swirl 45° (swirl) 60°

- Distribusi Kecepatan**

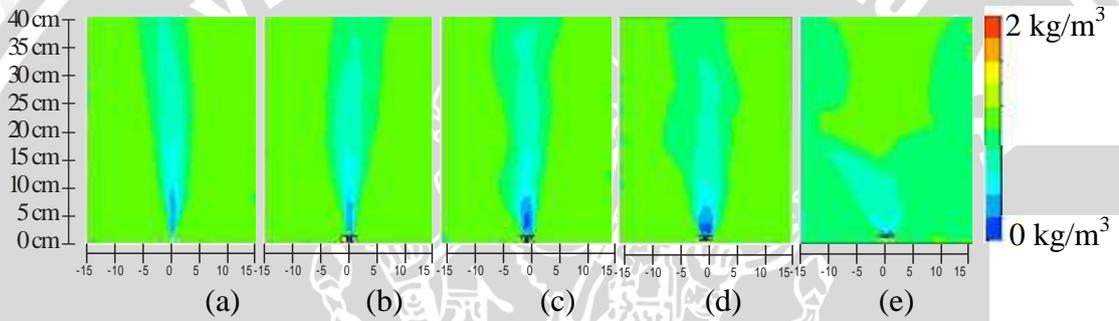
$V_u = 3\text{m/s}$   $V_b = 5\text{m/s}$



(a) tanpa swirl (b) swirl  $10^\circ$  (c) swirl  $30^\circ$  (d) swirl  $45^\circ$  (e) swirl  $60^\circ$

- Distribusi Densitas**

$V_u = 3\text{m/s}$   $V_b = 5\text{m/s}$



(a) tanpa swirl (b) swirl  $10^\circ$  (c) swirl  $30^\circ$  (d) swirl  $45^\circ$  (e) swirl  $60^\circ$



**DATA HASIL SIMULASI**  
**VARIASI KECEPATAN BAHAN BAKAR**

3 m/s					
z (cm)	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
3.2	995.95	1097.72	1550.37	1836.92	559.55
5.2	1354.99	1357.33	1788.72	1227.79	517.83
7.2	1255.31	1095.35	1201.24	888.05	489.44
9.2	1091.94	1002.76	864.82	715.60	473.98
11.2	804.32	815.56	684.63	608.65	451.96
13.2	713.78	713.34	643.39	564.30	417.77
15.2	680.72	694.30	645.36	538.71	366.53
17.2	652.32	656.98	586.26	493.23	337.38
19.2	604.20	626.49	530.65	499.97	323.18
21.2	591.25	608.16	487.24	491.06	309.86
23.2	547.55	599.78	446.97	469.98	301.84
25.2	539.37	538.44	426.68	459.32	300.00
27.2	513.28	509.24	431.62	457.63	300.00
29.2	488.57	498.54	442.21	462.39	300.00
31.2	484.83	484.33	456.91	457.41	300.00
33.2	474.43	451.30	415.59	437.61	300.00

5 m/s					
z (cm)	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
3.2	915.21	950.04	952.52	1839.99	722.38
5.2	1224.81	1275.57	1500.42	1811.01	660.31
7.2	1283.87	1317.90	1588.74	1433.85	599.78
9.2	1411.78	1466.09	1362.05	1075.74	533.22
11.2	1269.82	1125.37	1014.74	857.26	454.11
13.2	1089.59	1125.37	869.11	718.31	385.17
15.2	1016.17	1057.60	820.70	644.78	327.06
17.2	912.12	1000.83	727.39	554.70	305.68
19.2	763.88	922.91	665.06	525.26	303.82
21.2	733.62	878.54	642.95	496.31	301.25
23.2	674.41	857.58	629.88	449.60	300.00
25.2	668.85	758.04	637.50	425.65	300.00
27.2	611.83	701.84	588.69	436.34	300.00
29.2	597.45	677.58	542.77	452.36	300.00
31.2	548.08	645.74	507.10	475.86	300.00
33.2	544.15	580.50	455.44	502.84	300.00

z (cm)	7 m/s				
	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
3.2	860.72	893.95	692.91	1507.20	679.61
5.2	1179.49	1117.18	1261.23	1784.42	707.96
7.2	1262.27	1351.85	1434.94	1041.00	587.76
9.2	1457.00	1509.71	1433.96	848.16	546.11
11.2	1468.40	1466.29	1332.43	637.92	492.35
13.2	1356.99	1385.01	1331.11	581.61	426.73
15.2	1354.01	1297.80	1283.57	525.32	332.31
17.2	1261.28	1190.94	1078.59	491.45	302.75
19.2	993.85	1093.41	957.09	501.31	300.00
21.2	927.51	1048.97	861.97	494.96	300.00
23.2	860.84	1021.08	708.35	500.34	300.00
25.2	798.49	864.49	702.36	507.41	300.00
27.2	725.72	825.40	607.65	515.12	300.00
29.2	692.88	783.86	538.59	515.89	300.00
31.2	650.60	723.30	495.58	518.91	300.00
33.2	621.42	648.37	445.17	514.26	300.00



## VARIASI KECEPATAN UDARA

z (cm)	3 m/s				
	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300	300	300	300	300
3.2	840.087	901.864	695.55	1248.51	714.36
5.2	1036.24	1127.83	1220.69	1693.87	938.059
7.2	1110.44	1317.58	1269.47	1631.02	753.827
9.2	1314.92	1500.64	1240.15	1200.13	652.369
11.2	1357.52	1451.46	1141.36	925.278	496.564
13.2	1234.72	1350.15	1106.58	679.262	343.872
15.2	1139.28	1281.67	1082.24	569.93	313.939
17.2	1041.36	1231.9	974.506	488	309.958
19.2	856.399	1107.13	897.839	452.815	308.123
21.2	815.726	1031.92	842.575	438.638	307.983
23.2	664.575	975.452	715.34	409.78	305.657
25.2	674.826	851.9	697.626	403.482	304.787
27.2	606.239	768.608	590.189	403.4	302.141
29.2	538.882	732.137	525.514	397.501	301.469
31.2	507.552	680.52	491.726	380.623	300.607
33.2	488.372	585.068	451.095	368.42	300.096

z (cm)	5 m/s				
	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
3.2	915.21	950.04	952.52	1839.99	722.38
5.2	1224.81	1275.57	1500.42	1811.01	660.31
7.2	1283.87	1317.90	1588.74	1433.85	599.78
9.2	1411.78	1466.09	1362.05	1075.74	533.22
11.2	1269.82	1125.37	1014.74	857.26	454.11
13.2	1089.59	1125.37	869.11	718.31	385.17
15.2	1016.17	1057.60	820.70	644.78	327.06
17.2	912.12	1000.83	727.39	554.70	305.68
19.2	763.88	922.91	665.06	525.26	303.82
21.2	733.62	878.54	642.95	496.31	301.25
23.2	674.41	857.58	629.88	449.60	300.00
25.2	668.85	758.04	637.50	425.65	300.00
27.2	611.83	701.84	588.69	436.34	300.00
29.2	597.45	677.58	542.77	452.36	300.00
31.2	548.08	645.74	507.10	475.86	300.00
33.2	544.15	580.50	455.44	502.84	300.00

7 m/s					
z (cm)	temperatur (K)				
	tanpa	swirl 10	swirl 30	swirl 45	swirl 60
1.2	300	300	300	300	300
3.2	1056.69	1078.83	1347.07	1831.92	613.82
5.2	1338.24	1382.32	1823.34	1348.1	576.343
7.2	1312.27	1274.79	1513.69	966.164	538.565
9.2	1251.35	1246.68	1028.732	746.433	525.315
11.2	972.678	1011.33	800.373	626.99	513.387
13.2	837.219	865.152	689.913	578.978	487.494
15.2	808.818	822.683	624.389	560.066	422.876
17.2	758.298	783.373	563.787	518.812	330.684
19.2	682.108	745.749	493.729	523.695	310.765
21.2	664.353	724.238	451.676	506.075	300.953
23.2	615.151	712.736	438.575	484.262	300
25.2	599.215	641.074	412.547	475.439	300
27.2	566.084	608.329	410.312	456.785	300
29.2	549.129	597.516	400.312	447.845	300
31.2	536.883	576.44	436.331	444.507	300
33.2	531.01	532.602	450.085	433.598	300

