



TUGAS AKHIR – TF 181801

***ANALISIS PENGARUH FURNACE CHAMBER SHAPE  
PADA MILD COMBUSTION MENGGUNAKAN  
METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

KLORA HANGGIAYI  
NRP 0231154000080

Dosen Pembimbing  
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





TUGAS AKHIR – TF 181801

***ANALISIS PENGARUH FURNACE CHAMBER SHAPE  
PADA MILD COMBUSTION MENGGUNAKAN  
METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

KLORA HANGGIAYI  
NRP 0231154000080

Dosen Pembimbing  
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



*FINAL PROJECT – TF 181801*

***ANALYSIS EFFECT FURNACE CHAMBER SHAPE ON  
MILD COMBUSTION USING COMPUTATIONAL FLUD  
DYNAMIC METHOD***

KLORA HANGGIAYI  
NRP 0231154000080

*Supervisor*  
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D

*DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2019*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Kloro Hanggiayi  
NRP : 02311540000080  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S-1  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Analisis Pengaruh *Furnace Chamber Shape* pada *MILD Combustion* dengan Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamic*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 15 Juli 2019



Kloro Hanggiayi  
NRP 02311540000080

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH *FURNACE CHAMBER SHAPE*  
PADA *MILD COMBUSTION* DENGAN MENGGUNAKAN  
*METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC*

Oleh:

Klara Hanggiwi

NRP 0231154000080

Surabaya, 15 Juli 2019

Menyetujui,  
Pembimbing



Gungwan Nuroho S.T., M.T., P.hD

NIP. 19761223 200501 1 001

Mengetahui,

Departemen  
FTI - ITS



Hatta, S.T., M.Si., P.hD  
NIP. 19800902 200312 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALISIS PENGARUH FURNACE CHAMBER SHAPE  
PADA MILD COMBUSTION MENGGUNAKAN METODE  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC**

**TUGAS AKHIR**

Ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada


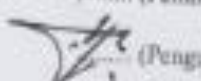
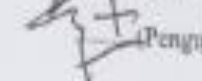
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

**KLORA HANGGIAYI**

**NRP 02311540000080**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.  (Pembimbing)
2. Ir. Roekmono, M.T.  (Penguji 1)
3. Dr. Suyanto, S.T., M.T.  (Penguji 2)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# ANALISIS PENGARUH *FURNACE CHAMBER SHAPE* PADA *MILD COMBUSTION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC*

**Nama** : Klora Hanggiayi  
**NRP** : 0231154000080  
**Departemen** : Teknik Fisika, FTI-ITS  
**Pembimbing** : Gunawan Nugroho, S.T., M.T., P.Hd

## Abstrak

Teknologi pembakaran dengan kualitas pembakaran yang baik dapat menghasilkan *temperature flame* yang optimal serta emisi NOx yang rendah. *MILD Combustion* merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mampu menurunkan *temperature peak flame* sehingga dapat memberikan *temperature* yang *uniform* di dalam ruang pembakaran. *MILD Combustion* dapat dicapai dengan adanya *flue gas recirculation* untuk menaikkan *temperatur preheated* serta memberikan pengenceran pada *oxidizer*.

Pada penelitian Tugas Akhir ini dilakukan penelitian mengenai efek *furnace chamber shape* pada *MILD Combustion* dengan menggunakan tipe pembakaran *partially premixed combustion*. Terdapat 5 variasi utama pada penelitian ini yaitu geometri *furnace* yang divariasikan sudut antara atap dan dinding *furnace* yaitu  $\alpha=80^\circ$ ,  $\alpha=85^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\alpha=95^\circ$  dan  $\alpha=100^\circ$ . Pada setiap geometri *furnace* akan divariasikan besarnya *equivalent ratio* yaitu  $\phi=0,9$  ;  $\phi=0,8$  ; dan  $\phi=0,7$ . Dari hasil simulasi menggunakan metode numerik CFD (*Computational Fluid Dynamic*) menunjukkan dengan penggunaan *MILD Combustion*, *temperature peak* yang dicapai tidak terlalu tinggi, dimana kenaikan *temperature* tertinggi adalah  $463^\circ$  K.

Variasi sudut  $\alpha$  akan memberikan perbedaan *temperature peak* yang dapat dicapai. Pada sudut  $\alpha$  yang semakin besar akan memberikan *temperature peak* yang semakin rendah. Sehingga *temperature peak* terendah terdapat pada *furnace* dengan sudut  $\alpha=100^\circ$ . Sedangkan pada *equivalent ratio* yang semakin mendekati 1 akan memberikan *temperature peak* yang semakin tinggi pula.

Dimana pada penelitian Tugas Akhir ini didapatkan *temperature peak* terendah pada *equivalent ratio* 0,7. Sedangkan untuk emisi NO<sub>x</sub> akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan *temperature peak* yang dicapai oleh pembakaran didalam *furnace*.

**Kata Kunci :** *MILD Combustion, Partially Premixed Combustion, Furnace Chamber Shape*

# ANALYSIS EFFECT FURNACE CHAMBER SHAPE ON MILD COMBUSTION USING COMPUTATIONAL FLUD DYNAMIC METHOD

**Student's Name** : Klora Hanggiayi  
**NRP** : 0231154000080  
**Departement** : Engineering Physics, FTI-ITS  
**Supervisor** : Gunawan Nugroho, S.T., M.T., P.hD

## Abstract

*Good combustion technology can produce optimal flame temperature and low NO<sub>x</sub> emission. MILD Combustion is a combustion technology that can reduce maximum flame temperature and provide uniform temperature in the combustion chamber. MILD Combustion can be achieved by the presence of flue gas recirculation in order to increase the preheated temperature and provide oxidizer dilution.*

*In this research, the effect of furnace chamber shape on MILD Combustion was carried out using partially premixed combustion type. There are 5 main variations in this study, namely variations in the angle between the roof and furnace walls of  $\alpha = 80^\circ$ ,  $\alpha = 85^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 95^\circ$  and  $\alpha = 100^\circ$  Each furnace geometry will vary the amount of equivalent ratio  $\phi=0,9$ ;  $\phi=0,8$ ; and  $\phi=0,7$ . From the simulation results using numerical methods CFD (Computational Fluid Dynamic) shows that with the use of MILD Combustion, the maximum temperature achieved is not too high, where the highest increase in temperature is  $463^\circ\text{K}$ .*

*The angle variation will give difference temperature peak that can be achieved. The greater the angle  $\alpha$  will give the lower peak temperature The lowest temperature peak is found in the furnace with angle  $\alpha 100^\circ$ . Whereas the equivalent ratio which is approaching 1 will give higher peak temperatures. In this research we can conclude that the lowest temperature peak at equivalent ratio 0,7. While for NO<sub>x</sub> emission will increase along with the increase temperature peak combustion.*

**Keyword** : MILD Combustion, Partially Premixed Combustion, Furnace Chamber Shape

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT senantiasa penulis panjatkan atas semua yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “ **Analisis Pengaruh Furnace Chamber Shape pada MILD Combustion Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic** ” dengan lancar.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua serta keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan dan doanya kepada penulis
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, P.hD selaku ketua Departemen Teknik Fisika FTI-ITS
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., P.hD selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan pengarahan dan motivasi kepada penulis
4. Seluruh dosen penguji Tugas Akhir penulis yang senantiasa memberikan masukan agar Tugas Akhir ini dapat lebih baik lagi
5. Teman-teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan yang telah menemani dan memberikan dukungan serta doanya selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Fisika FTI-ITS
6. Semua pihak yang membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini

Penulis juga berharap bahwa Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembacanya. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam Tugas Akhir ini, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan.

Surabaya, 15 Juli 2019

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PAGE OF TITTLE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR PENGESAHAN I .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR PENGESAHAN II .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Abstrak.....	xi
Abstract .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Furnace .....	5
2.2. Reaksi Pembakaran .....	6
2.3. Stoikiometri Pembakaran .....	7
2.4. MILD Combustion .....	9
2.5. Partially Premixed Combustion .....	10
2.6. Computational Fluid Dynamics .....	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	13
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	13
3.2. Pengumpulan Data .....	16
3.3. Pemodelan Reaksi Partially Premixed Combustion menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic .....	18

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	23
4.1. Validasi Hasil Simulasi CFD.....	23
4.2. Data Hasil Simulasi Reaksi Pembakaran .....	26
BAB V PENUTUP.....	39
5.1. Kesimpulan.....	39
5.2. Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA .....	41
LAMPIRAN.....	43
BIODATA PENULIS .....	47

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Furnace.....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Pembakaran sempurna CH <sub>4</sub> dan udara.....	7
<b>Gambar 2. 3</b> Jenis-jenis pembakaran (Oberlack, R, & Peters N, 2000).....	9
<b>Gambar 2. 4</b> Grafik hubungan antara kenaikan suhu dengan temperatur inlet pada MILD Combustion (Oberlack, R, & Peters N, 2000).....	10
<b>Gambar 2. 5</b> Partially Premixed Combustion.....	11
<b>Gambar 3. 1</b> Skema diagram penelitian tugas akhir .....	14
<b>Gambar 3. 2.</b> Diagram blok cara kerja furnace .....	15
<b>Gambar 3. 3</b> Desain furnace (Tu, Yaojie, dkk, 2014) .....	17
<b>Gambar 3. 4</b> Desain kondisi variasi furnace (Tu, Yaojie, dkk, 2014).....	18
<b>Gambar 3. 5</b> Domain fluida pada furnace dengan $\alpha = 90^\circ$ (geometri furnac dasar).....	19
<b>Gambar 3. 6</b> Hasil kualitas skewness dan orthogonal quality ...	20
<b>Gambar 3. 7</b> Kriteria kualitas skewness dan orthogonal quality	20
<b>Gambar 3. 8</b> Hasil meshing pada geometri furnace dengan $\alpha = 90^\circ$ (geometri furnace dasar).....	20
<b>Gambar 4. 1</b> Kontur temperatur validasi pada ekivalen ratio 1 (a) Mesh A (b) Mesh B (c) Mesh C (d) Mesh D (e) Mesh E .....	25
<b>Gambar 4. 2</b> Grafik temperatur pada $\varnothing = 0,9$ .....	28
<b>Gambar 4. 3</b> Kontur temperatur pada $\varnothing = 0,9$ (a) $\alpha = 80^\circ$ (b) $\alpha = 85^\circ$ (c) $\alpha = 90^\circ$ (d) $\alpha = 95^\circ$ (e) $\alpha = 100^\circ$ .....	29
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik temperature flame secara axial pada $\varnothing = 0,9$ .....	30
<b>Gambar 4. 5</b> Grafik polutan NO <sub>x</sub> pada $\varnothing = 0,9$ .....	31
<b>Gambar 4. 6</b> Grafik temperatur pada $\varnothing = 0,8$ .....	31
<b>Gambar 4. 7</b> Kontur temperatur pada $\varnothing = 0,8$ (a) $\alpha = 80^\circ$ (b) $\alpha = 85^\circ$ (c) $\alpha = 90^\circ$ (d) $\alpha = 95^\circ$ (e) $\alpha = 100^\circ$ .....	32
<b>Gambar 4. 8</b> Grafik temperature flame di sepanjang furnace pada $\varnothing = 0,8$ .....	33
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik polutan NO <sub>x</sub> pada $\varnothing = 0,8$ .....	34
<b>Gambar 4. 10</b> Grafik temperatur pada $\varnothing = 0,7$ .....	34

<b>Gambar 4. 11</b> Kontur temperatur pada $\varnothing = 0,7$ (a) $\alpha = 80^\circ$ (b) $\alpha = 85^\circ$ (c) $\alpha = 90^\circ$ (d) $\alpha = 95^\circ$ (e) $\alpha = 100^\circ$ .....	35
<b>Gambar 4. 12</b> Grafik temperature flame di sepanjang furnace pada $\varnothing = 0,7$ .....	36
<b>Gambar 4. 13</b> Grafik polutan NOx pada $\varnothing = 0,7$ .....	37
<b>Gambar 4. 14</b> Distribusi kecepatan pada bidang XY pada $z = 1\text{m}$ .....	38

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Kondisi batas ruang pembakaran .....	15
<b>Tabel 3. 2</b> Kondisi variasi penelitian tugas akhir .....	16
<b>Tabel 3. 4</b> Desain variasi furnace.....	17
<b>Tabel 3. 5</b> Kondisi Batas.....	21
<b>Tabel 3. 6</b> Persamaan Turbulen .....	21
<b>Tabel 4. 1</b> Tabel hasil validasi .....	24
<b>Tabel 4. 2</b> Tabel validasi fraksi mol.....	26
<b>Tabel 4. 3</b> Tabel hasil simulasi CFD.....	27

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Menurut penelitian yang dilakukan oleh *International Energy Agency*, sekitar 81% dari total konsumsi energi dunia berasal dari bahan bakar fosil (*International Energy Agency*, 2015). Pembakaran yang menggunakan bahan bakar fosil inilah yang akhirnya akan menghasilkan polutan berupa emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> yang dapat mengganggu lingkungan. Selain itu, seiring dengan adanya pemanasan global, regulasi untuk mengurangi emisi hasil pembakaran ini juga terus diperketat sesuai dengan yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah No 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Hal inilah yang menjadi tuntutan bagi industri dan perusahaan pembangkit sebagai pengguna bahan bakar fosil terbesar untuk mengembangkan sistem pembakaran yang dapat mengatasi emisi gas buang hasil pembakaran. Penelitian dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) Indonesia mengungkapkan bahwa penggunaan bahan bakar fosil, terutama gas bumi (*natural gas*), diperkirakan meningkat 4,3% tiap tahunnya (BPPT, 2015). Hal ini menunjukkan bahwa cadangan bahan bakar fosil akan semakin berkurang dan di masa yang akan datang dapat habis. Berdasarkan hal diatas, dapat disimpulkan bahwa permasalahan pokok di bidang teknologi pembakaran adalah menciptakan teknologi pembakaran yang memiliki kualitas pembakaran yang baik, sehingga dapat memberikan *temperature flame* yang optimal serta emisi NO<sub>x</sub> yang rendah.

Dalam perkembangannya telah diteliti beberapa teknologi pembakaran seperti *Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD)-Concept*, *Flameless Oxidation (FLOX)* dan *High Temperature Air Combustion (HiTAC)* (Tu, et al., 2014). *MILD (Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution) Combustion* dapat menjadi salah satu solusi yang menjanjikan dalam teknologi pembakaran di industri yang menghasilkan emisi NO<sub>x</sub> yang rendah dan kualitas pembakaran yang baik (Cavalierew & Joannon, 2004). *MILD Combustion* mampu menurunkan *temperature peak flame*

sehingga dapat memberikan *temperature* yang *uniform* di dalam ruang pembakaran. *MILD Combustion* dapat dicapai dengan adanya *flue gas recirculation* untuk menaikkan *temperature preheated* serta memberikan pengenceran pada *oxidizer*. *Cavaliere* dan *Joannon* (2004) menyebutkan bahwa dengan memberikan pengenceran pada *oxidizer* maka akan membantu menurunkan *temperature peak* dengan kondisi *temperature inlet* yang sama.

Beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai *MILD Combustion* yang berfokus pada parameter geometri hanya fokus pada desain burner, seperti kecepatan dan arah injeksi bahan bakar dan *oxidizer*, jarak antar *nozzle*, serta letak dan susunan *burner*. Pada tahun 2010 (*Schaffel-Mancini, Mancini, Szlek, & Weber, Novel Conceptual Design of Supercritical Pulverized Coal Boiler Utilizing High Temperature Air Combustion (HTAC) Technology*, 2010) dan tahun 2014 (*Tu, et al., 2014*) melakukan penelitian mengenai konsep *combustion chamber shape* untuk desain *supercritical boiler* dan *furnace* yang menggunakan konsep *HTAC Combustion* dan *MILD Combustion*. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa *design* dari *combustion chamber shape* mempengaruhi internal resirkulasi di dalam boiler yang nantinya akan mempengaruhi kualitas pembakaran dari *MILD Combustion*.

Dari penelitian-penelitian sebelumnya mengenai tipe pembakaran, penelitian mengenai *partially premixed* sendiri masih sedikit (*Aji, 2018*), terlebih lagi penerapannya pada *MILD Combustion*. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan mengenai penerapan tipe pembakaran *partially premixed* pada *MILD Combustion* yang berbasis simulasi numerik pada *furnace chamber shape*. Penelitian ini akan dilakukan pada 5 variasi desain *furnace chamber shape* dengan 3 variasi *ekivalen ratio* pada setiap desainnya. Kemudian kualitas pembakaran akan dinilai melalui persebaran *temperature* di sepanjang *furnace chamber* serta emisi NOx yang dihasilkan.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka permasalahan yang di angkat dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh variasi geometri *furnace chamber shape* terhadap *temperature flame* yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi geometri *furnace chamber shape* terhadap emisi NOx yang dihasilkan?

## 1.3. Tujuan

Tujuan dilakukannya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi geometri *furnace chamber shape* terhadap *temperatur flame* yang dihasilkan
2. Menganalisis pengaruh variasi geometri *furnace chamber shape* terhadap emisi NOx yang dihasilkan

## 1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Tipe pembakaran yang digunakan adalah *partially premixed combustion*.
2. Ruang pembakaran yang digunakan berdasarkan pada model penelitian sebelumnya (Orsino & Weber, 2013)
3. Jenis bahan bakar yang digunakan berdasarkan pada model penelitian sebelumnya (Tu, et al., Effect of Furnace Chamber Shape on The MILD Combustion of Natural Gas, 2014)
4. Simulasi untuk mengetahui profil aliran menggunakan *Computational Fluid Dynamics* dengan persamaan model turbulensi *K-epsilon*.
5. Kondisi batas pada sisi *inlet* berupa *massflow inlet* dan pada sisi *outlet* berupa *pressure outlet*.
6. Simulasi dilakukan hanya pada domain fluida

## 1.5. Manfaat

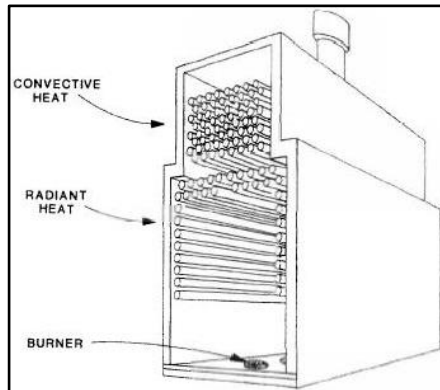
Pada penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa pengetahuan mengenai pengaruh *furnace chamber shape* terhadap kualitas pembakaran. Selain itu,

penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi tambahan kajian mengenai penerapan tipe pembakaran *partially premixed combustion* pada *furnace*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Furnace

*Furnace* (tungku pembakaran) adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk pemanasan. *Furnace* adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memanaskan cairan di dalam tube, dengan sumber panas yang berasal dari proses pembakaran yang menggunakan bahan bakar secara terkendali di dalam *burner*. Idealnya, *furnace* harus memanaskan sebanyak mungkin sampai mencapai suhu yang seragam dengan bahan bakar sesedikit mungkin. Untuk mendapatkan operasi tungku yang efisien, maka pembakaran bahan bakar harus diusahakan sempurna dengan udara berlebih yang minimum. *Furnace* sendiri beroperasi dengan efisiensi yang relatif rendah (sekitar 7%) dibandingkan dengan peralatan pembakaran yang lainnya seperti *boiler* (dengan efisiensi 90%). Hal ini disebabkan oleh suhu operasi yang tinggi dalam *furnace*.



**Gambar 2. 1** *Furnace* (Lieberman, 2008)

*Furnace* banyak digunakan untuk keperluan industri, seperti ekstraksi logam, kilang minyak, pabrik kimia dan sebagai sumber untuk kolom distilasi fraksional. Adapun bahan bakar yang paling umum digunakan untuk *furnace* modern adalah gas alam (*Natural Gas*), LPG (*Liquefied Petroleum Gas*), bahan bakar, minyak dan batu bara. Dimensi *furnace* dan kemampuan menghasilkan

panasnya dapat ditentukan berdasarkan perhitungan sesuai fungsi dan kebutuhannya. Misalnya, pada *furnace* yang digunakan untuk kebutuhan pembangkit listrik akan dibuat dengan ukuran yang besar karena untuk menghasilkan uap melalui boiler diperlukan energi panas yang besar pula.

## 2.2. Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah serangkaian reaksi-reaksi kimia eksothermal antara bahan bakar dan *oksidizer* berupa udara yang disertai dengan produksi energi berupa panas dan konversi senyawa kimia. Pelepasan panas dapat mengakibatkan timbulnya cahaya dalam bentuk api. Bahan bakar yang umum digunakan dalam pembakaran adalah senyawa organik, khususnya hidrokarbon dalam fasa gas, cair atau padat. Pembakaran yang sempurna dapat terjadi jika ada oksigen dalam prosesnya.

Bahan bakar yang memiliki fase padat atau cair harus diubah kedalam fase gas sebelum dibakar. Biasanya dibutuhkan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Nitrogen, yang merupakan kandungan utama dari udara, dapat mengurangi transfer panas pada permukaan alat penukar panas serta meningkatkan volume hasil pembakaran yang juga harus dialirkan melalui alat penukar panas sampai ke saluran keluar ruang pembakaran (Rahmadsyah, 2016).

Nitrogen ini juga dapat bergabung dengan oksigen (terutama pada suhu nyala yang tinggi) untuk menghasilkan oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), yang merupakan gas pencemar beracun. Karbon, hidrogen, dan sulfur dalam bahan bakar bercampur dengan oksigen di udara membentuk karbon dioksida, uap air dan sulfur dioksida melepas panas masing-masing 8.048 kkal, 28.992 kkal dan 2.224 kkal. Pada kondisi tertentu, karbon juga dapat bergabung dengan oksigen membentuk karbon monoksida, dengan melepaskan sejumlah kecil panas (2.430 kkal/kg karbon). Karbon terbakar yang membentuk CO<sub>2</sub> akan menghasilkan lebih banyak panas persatuan bahan bakar daripada bila menghasilkan CO atau asap (Rahmadsyah, 2016).

Berdasarkan prosesnya pembakaran dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *Complete Combustion* dan *Incomplete Combustion*.

**a. Complete Combustion**

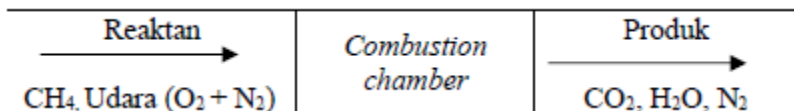
Pada pembakaran sempurna, reaktan akan terbakar dengan oksigen dan menghasilkan sejumlah produk hasil pembakaran. Ketika hidrokarbon terbakar sempurna dengan oksigen, maka produk pembakaran hanya akan menghasilkan gas karbon dioksida dan uap air. Namun, pada beberapa kasus pembakaran sempurna masih dihasilkan senyawa nitrogen dioksida. Nitrogen dioksida sendiri merupakan hasil teroksidasinya senyawa nitrogen didalam udara. Pembakaran sempurna hampir tidak mungkin tercapai pada kehidupan nyata

**b. Incomplete Combustion**

Pembakaran tidak sempurna umumnya terjadi pada kondisi dimana tidak tersedia oksigen dalam jumlah yang cukup untuk membakar bahan bakar. Pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan zat-zat seperti karbon dioksida, karbon monoksida, uap air dan karbon. Pembakaran yang tidak sempurna sangat sering terjadi, karena karbon dioksida merupakan zat yang sangat berbahaya bagi manusia. Kualitas pembakaran dapat ditingkatkan dengan perancangan media pembakaran yang lebih baik dan optimasi proses.

**2.3. Stoikiometri Pembakaran**

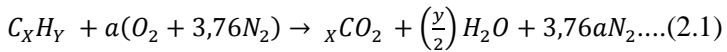
Kuantitas stoikiometri adalah rasio antara berat udara (*oxidizer*) yang dibutuhkan dengan berat bahan bakar. Jika rasio antara bahan bakar dan *oxidizer* lebih besar dari kondisi stoikiometri, maka proses pembakaran akan terjadi pada kondisi *lean*. Sedangkan jika jumlah udara yang diberikan kurang dari atau tidak mencapai kondisi stoikiometri, maka proses pembakaran dikatakan terjadi pada kondisi *rich* (Aji, 2018).



**Gambar 2. 2** Pembakaran sempurna CH<sub>4</sub> dan udara

Pada gambar 2.2. menunjukkan sistem pembakaran dengan kriteria pembakaran sempurna dari *methane* dan udara yang terdiri dari oksigen dan nitrogen untuk membentuk karbon dioksida, nitrogen, dan air sebagai hasil reaksi.

Rasio antara *oxidizer* dan bahan bakar ditentukan dengan menulis reaksi kesetimbangan, dengan asumsi bahan bakar bereaksi membentuk produk (Aji, 2018). Untuk bahan bakar *hidrokarbon* dengan struktur  $C_xH_y$ , reaksi kesetimbangan dapat dituliskan sebaga berikut



dimana,

$$a = x + \frac{y}{4} \dots \dots \dots (2.2)$$

Reaksi kesetimbangan diatas dapat disederhanakan dengan mengasumsikan komposisi udara adalah 21% oksigen (O<sub>2</sub>) dan 79% Nitrogen (N<sub>2</sub>), jadi untuk setiap mol oksigen mengandung 3,76 mol nitrogen. Persamaan 2.1. menggambarkan pemecahan ikatan antara atom (elemen) membentuk  $C_xH_y$  dan oksigen, dan pengaturan ulangnya membangun molekul karbon dioksida dan air. Koefisien dalam persamaan kimia lebih sering dianggap sebagai jumlah Kmoles zat yang mengambil bagian dalam reaksi. Dimana semua zat mengambil bagian dalam reaksi kimia dapat diperlakukan sebagai gas ideal. *Ekivalen rasio* untuk *fuel-air* dapat dituliskan sebagai berikut (Irianto)

$$\frac{A}{F_{stoic}} = \left( \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} \dots \dots \dots (2.3)$$

$m_{air}$  dan  $m_{fuel}$  adalah berat molekul dari udara dan bahan bakar. Pada umumnya, *mixture ratio* antara *fuel-air* dapat dituliskan sebagai sebagai berikut

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\frac{A}{F}} = \frac{\frac{F}{A}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic}} \dots \dots \dots (2.4)$$

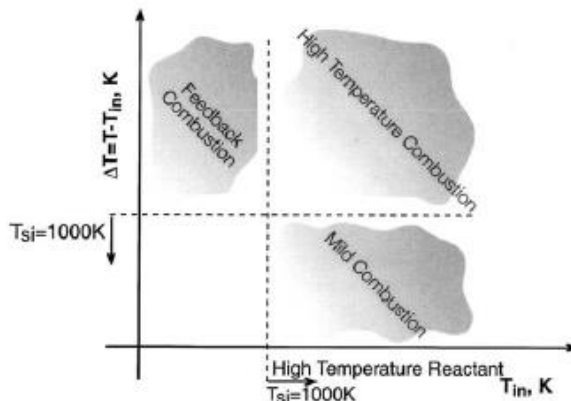


Dari definisi diatas dapat diketahui bahwa untuk kondisi *rich* memiliki  $\Phi > 1$  dan untuk kondisi udara yang *lean*  $\Phi < 1$ . Untuk kondisi equilibrium maka  $\Phi = 1$

## 2.4. MILD Combustion

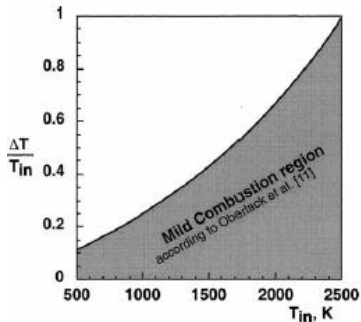
*MILD combustion* merupakan teknologi ruang pembakaran yang dapat menaikkan temperatur campuran reaktan sehingga menjadi lebih besar dari temperature *self-ignition* campuran (E.Benini, 2013). Peningkatan temperature ini didapatkan dengan menambahkan *recuperator* atau *pre-combustor*. Konsep pembakaran dengan menggunakan teknologi *heat recirculation* telah dijelaskan pada penelitian sebelumnya bahwa dengan menggunakan konsep ini dapat meningkatkan efisiensi termal (Wunning & Wunning, 1997).

Berdasarkan gambar 2.2 dapat dilihat bahwa ada 3 jenis pembakaran berdasarkan kondisi temperatur *self ignition* dan kenaikan temperaturnya yaitu *feedback combustion*, *high temperatur combustion* dan *MILD combustion*. *MILD Combustion* berada pada posisi kanan bawah yang mengindikasikan bahwa temperatur *self ignition* pada *MILD Combustion* berada diatas  $1000^{\circ}\text{K}$  dan kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan *feedback combustion* dan *high temperatur combustion*.



**Gambar 2. 3** Jenis-jenis pembakaran (Oberlack, R, & Peters N, 2000)

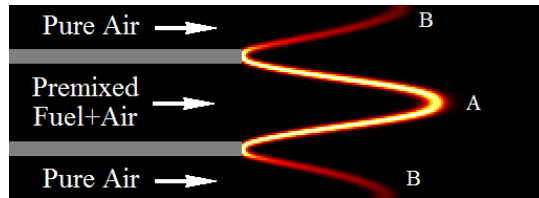
Pada gambar 2.3 menunjukkan penelitian yang dilakukan oleh (Oberlack, R, & Peters N, 2000) yang menunjukkan hubungan antara  $T_{in}$  dan  $\Delta T$ . Dari gambar 2.3 menunjukkan bahwa pada *MILD Combustion* kenaikan temperatur tidak pernah lebih besar daripada *temperature inlet*.



**Gambar 2. 4** Grafik hubungan antara kenaikan suhu dengan temperatur inlet pada MILD Combustion (Oberlack, R, & Peters N, 2000)

## 2.5. Partially Premixed Combustion

*Partially Premixed Combustion* merupakan *premixed flames* dengan campuran *fuel-oxidizer* yang tidak seragam (*equivalence ratio*). *Partially premixed combustion* terjadi dari pencampuran antara *premix combustion* yang diberi tambahan udara oleh *secondary inlet*. *Ekivalen ratio* primer didefinisikan sebagai *ekivalen ratio* pada inlet primer, sedangkan *ekivalen ratio* total didefinisikan sebagai *ekivalen ratio* keseluruhan yang digunakan dalam pembakaran (total keseluruhan dari inlet primer dan inlet sekunder). Komposisi dari hasil pembakaran dapat dimodelkan dengan mengasumsikan kesetimbangan kimia atau *steady laminar diffusion flamelet* (Gupta, 1984).



**Gambar 2. 5** Partially Premixed Combustion

## 2.6. Computational Fluid Dynamics

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah sebuah metode berbasis komputer untuk mensimulasikan perilaku suatu aliran yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan proses fisik lainnya. Cara kerjanya dengan memecahkan persamaan-persamaan aliran fluida (dalam bentuk tertentu) meliputi suatu daerah yang diinginkan, dengan kondisi pada batas-batas daerah tersebut.

Ada 3 tahap utama dalam melakukan simulasi CFD yaitu:

### 3. *Pre Processing*

Pada tahap *Pre processing* dilakukan input dari fluida. Beberapa kegiatan yang masuk dalam bagian ini adalah sebagai berikut:

- Pendefinisian dari geometri daerah kajian dan domain komputasi
- *Grid generation* yaitu pembagian domain ke domain domain yang lebih kecil yaitu *grid* atau *mesh* dari elemen elemen kecil (*cells*)
- Pemilihan fenomena fisik dan kimia dari masalah yang dimodelkan
- Pendefinisian sifat fluida
- Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada *cell* yang bersinggungan dengan batas domain

Oleh karena itu *grid* yang optimal memiliki *mesh* yang tidak seragam, dengan *mesh* yang halus di area yang terjadi perubahan dari titik ke titik lain dan *mesh* yang lebih kasar di area dengan perubahan sedikit. Kemampuan yang juga dikembangkan adalah *self-adaptive meshing* yaitu kemampuan memperhalus *grid* di daerah dengan variasi tinggi. Secara umum

terdapat 2 bagian yang dominan di tahap *Pre Processing* ini yaitu definisi geometri dari domain dan *Grid generation*.

b. *Solver*

Terdapat beberapa metode utama dalam mencari solusi numerik yaitu *finite difference*, *finite element* dan *spectral method*. Secara garis besar metode numerik yang menjadi dasar dari solver melakukan hal-hal sebagai berikut:

- Aproksimasi dari vektor aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana
- Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan-persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis
- Solusi dari persamaan aljabar dengan metode vektor

c. *Post Processing*

Bagian ini mengandung kemampuan grafis yang dibutuhkan untuk menampilkan hasil termasuk kemampuan visual yang lain seperti animasi. Hal lain yang juga termasuk adalah display *grid* dan domain geometri, plot vektor, plot kontur, plot permukaan 2D atau 3D, *particle tracking*, animasi dan lain sebagainya.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

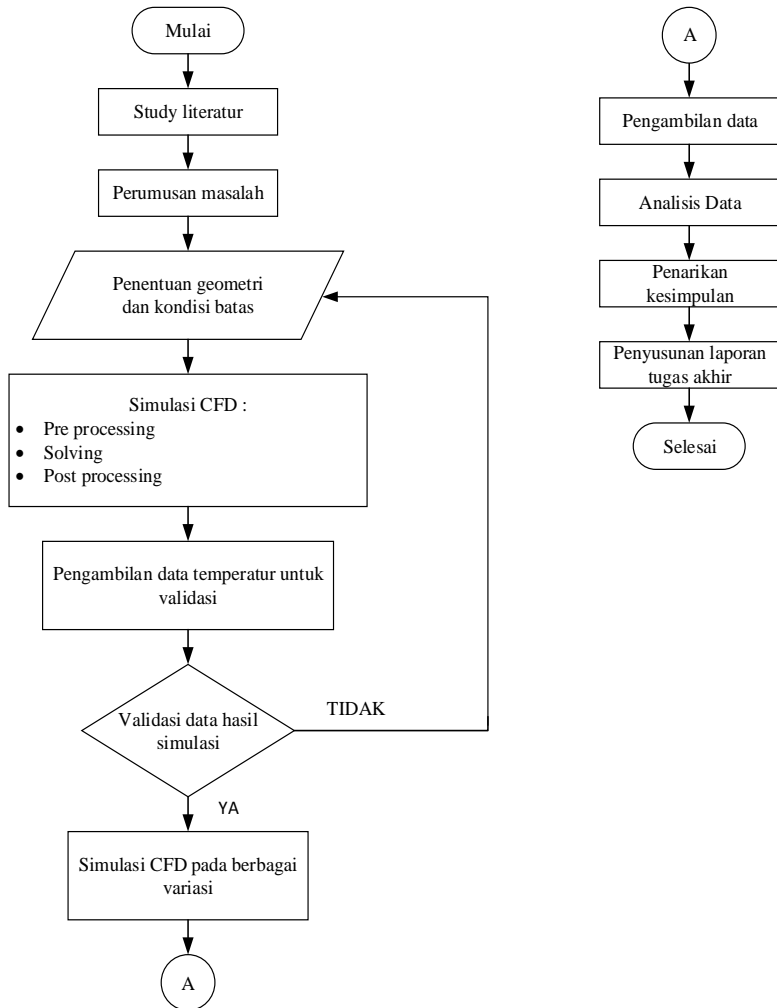
Penelitian tugas akhir ini memuat topik pembakaran yang terjadi pada *furnace* dengan menerapkan tipe pembakaran *partially premixed combustion* serta meninjau pengaruh dari *furnace chamber shape* pada geometri *furnace* yang digunakan oleh Orsino, dkk (2013). Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kualitas pembakaran yang lebih baik dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian ini dilakukan sesuai dengan alur penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.1.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* komputasi CFD yang dibagi menjadi 3 tahap. Pada tahap awal yaitu *pre-processing* dilakukan pembuatan desain untuk setiap variasi geometri *furnace* serta proses *meshing*. Kemudian pada tahap *processing* akan dilakukan penghitungan data-data input menggunakan persamaan-persamaan yang ada di dalam CFD. Dan yang terakhir pada tahap *post processing*, dimana pada tahap ini data hasil perhitungan direpresentasikan ke dalam grafik, gambar maupun animasi dengan pola warna tertentu.

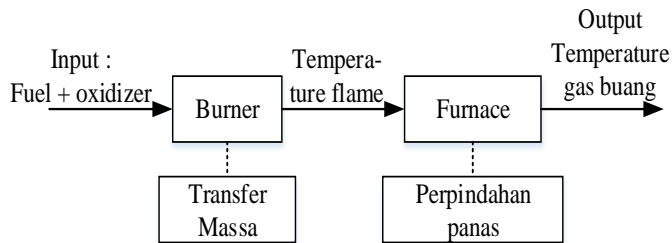
Penelitian tugas akhir ini memiliki 5 variasi geometri *furnace chamber shape* yaitu sudut antara dinding dan atap *furnace* (sudut  $\alpha$ ) sebesar  $\alpha=80^\circ$ ,  $\alpha=85^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\alpha=95^\circ$  dan  $\alpha=100^\circ$  (gambar 3.3.) seperti penelitian yang dilakukan oleh Yaojie Tu, dkk (2014) serta 3 variasi *ekivalen ratio* total sebesar 0,7; 0,8; dan 0,9 seperti penelitian yang dilakukan oleh P. Li, dkk (2014). Adanya variasi pada geometri *furnace chamber shape* serta nilai *ekivalen ratio* dilakukan karena kedua variasi ini akan mempengaruhi *temperature peak* serta emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1. Sedangkan untuk proses validasi digunakan *ekivalen ratio* sama dengan 1 (kondisi pembakaran stoikiometri) dan dengan sudut  $\alpha=90^\circ$ . Untuk proses validasi sendiri digunakan metode *grid independence*.

Pemodelan reaksi pembakaran *partially premixed* ini dilakuakn menggunakan metode numerik CFD (*Computational*

*Fluid Dynamic*) yang terdapat pada perangkat lunak ANSYS FLUENT. Dari pemodelan tersebut akan didapatkan distribusi *temperature* dan kecepatan serta jumlah emisi NO<sub>x</sub> (ppm) dari hasil reaksi pembakaran tersebut.



**Gambar 3. 1** Skema diagram penelitian tugas akhir



**Gambar 3. 2.** Diagram blok cara kerja *furnace*

Diagram blok cara kerja *furnace* sendiri dapat dilihat pada gambar 3.2. Setelah bahan bakar dan *oxidizer* di injeksikan ke dalam ruang bakar, maka akan terjadi reaksi pembakaran pada *burner*. Pada simulasi CFD, untuk memodelkan reaksi pembakaran yang terjadi digunakan pemodelan *species transport*. *Species transport* adalah salah satu metode untuk membantu memodelkan konservasi *species* kimia menggunakan prinsip transfer *massa* dan konveksi *massa*. *Temperature flame* yang dihasilkan dari reaksi pembakaran nantinya akan digunakan untuk memanaskan fluida di dalam ruang bakar melalui mekanisme perpindahan panas. Mekanisme perpindahan panas yang terjadi dapat berupa konduksi, konveksi dan radiasi.

Untuk kondisi batas yang diterapkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2.

**Tabel 3. 1** Kondisi batas ruang pembakaran

Kondisi batas	Keterangan	
Inlet primer	Tipe	Massflow inlet
	Flowrate	830 kg/h
	Temperature	300° K (fuel) 1573° K (oxidizer)
Inlet sekunder	Tipe	Massflow inlet
	Flowrate	47 kg/h
	Temperature	1573° K (fuel)
Outlet	Tipe	Pressure outlet

**Tabel 3. 2** Kondisi variasi penelitian tugas akhir

Variasi	Konfigurasi	Ekivalen Ratio
1	$\alpha = 80^\circ$	$\emptyset = 0,9$
2		$\emptyset = 0,8$
3		$\emptyset = 0,7$
4	$\alpha = 85^\circ$	$\emptyset = 0,9$
5		$\emptyset = 0,8$
6		$\emptyset = 0,7$
7	$\alpha = 90^\circ$	$\emptyset = 0,9$
8		$\emptyset = 0,8$
9		$\emptyset = 0,7$
10	$\alpha = 95^\circ$	$\emptyset = 0,9$
11		$\emptyset = 0,8$
12		$\emptyset = 0,7$
13	$\alpha = 100^\circ$	$\emptyset = 0,9$
14		$\emptyset = 0,8$
15		$\emptyset = 0,7$

### 3.2. Pengumpulan Data

Adapun data-data yang digunakan sebagai penunjang penelitian ini didapatkan dari penelitian-penelitian sebelumnya, yang meliputi:

- a. Data desain ruang pembakaran berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Orsino, dkk pada tahun 2013 (Orsino & Weber, 2013)
- b. Data komposisi bahan bakar dan *oxidizer* berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Yaouji Tu, dkk pada tahun 2014 (Tu, et al., Effect of Furnace Chamber Shape on The MILD Combustion of Natural Gas, 2014)

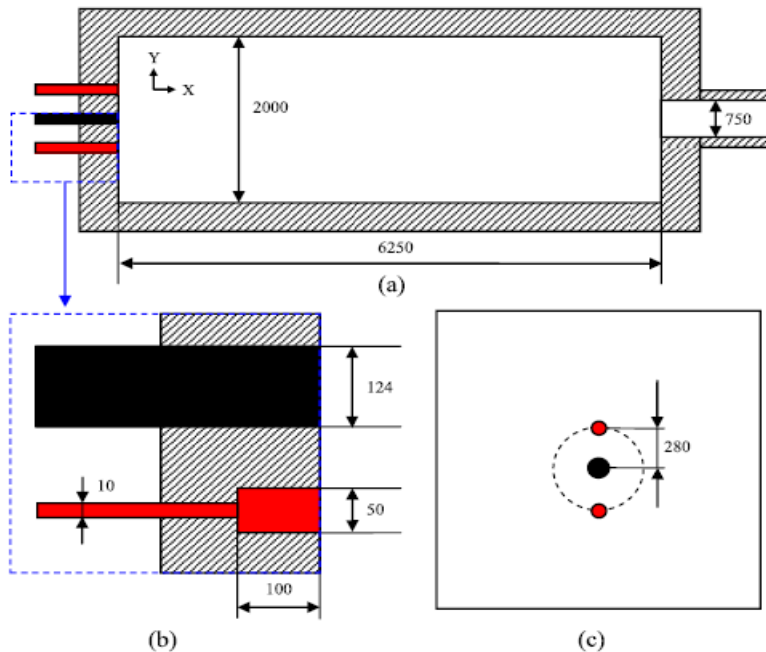
Pada penelitian ini, digunakan desain ruang pembakaran dari penelitian yang dilakukan oleh Orsino, dkk (2013). Pada penelitian tersebut, digunakan desain *furnace* dengan ukuran 2m x 2m x



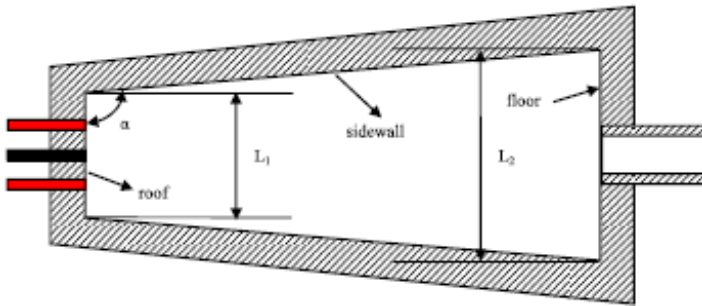
6,25m sebagai referensi utama. Sedangkan untuk variasi desain *furnace* yang lain dapat dilihat pada tabel 3.3. *Furnace* yang digunakan untuk penelitian ini memiliki 3 *inlet* dan 1 *outlet*. 3 *inlet* tersebut terdiri dari 1 buah *inlet* primer dan 2 buah *inlet* sekunder, dimana *inlet* primer terletak di antara 2 *inlet* sekunder. Pada *inlet* primer digunakan sebagai *inlet fuel* dan *oxidizer*, sedangkan pada *inlet* sekunder akan digunakan sebagai *inlet oxidizer* tambahan. Desain dari *furnace* yang digunakan untuk penelitian dapat dilihat pada gambar 3.2.

**Tabel 3. 3** Desain variasi *furnace*

Parameter	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
$\alpha$	80°	85°	90°	95°	100°
L1 (mm)	2998	2524	2000	1426	795
L2 (mm)	795	1426	2000	2524	2998



**Gambar 3. 3** Desain *furnace* (Tu, Yaojie, dkk, 2014)



**Gambar 3. 4** Desain kondisi variasi *furnace* (Tu, Yaojie, dkk, 2014)

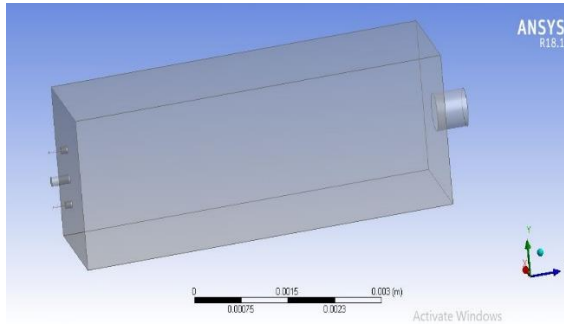
Pada penelitian ini digunakan 3 variasi *equivalen ratio* total yang berada pada kondisi *lean* yaitu 0,9; 0,8; dan 0,7. Untuk bahan bakar yang digunakan berupa *natural gas* dengan komposisi 87,8% CH<sub>4</sub>; 4,6% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 1,6% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dan 5,5% N<sub>2</sub>. Sedangkan untuk *oxidizer* terdiri dari 59,1% N<sub>2</sub>; 19,5% O<sub>2</sub>; 15% H<sub>2</sub>O dan 6,4% CO<sub>2</sub>.

### 3.3. Pemodelan Reaksi Partially Premixed Combustion menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic

Untuk melakukan pemodelan reaksi pembakaran, dilakukan menggunakan metode numerikal CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Adapun langkah-langkah pemodelan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Pembuatan geometri *furnace*

Pembuatan geometri *furnace* dilakukan untuk merepresentasikan domain fluida didalam *furnace*. Pembuatan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak *Inventor*. Sedangkan ukuran geometri yang dibuat berdasarkan gambar 3.2. Pada geometri juga didefinisikan 3 saluran masuk (*inlet*) dan 1 saluran keluar (*outlet*)



**Gambar 3. 5** Domain fluida pada furnace dengan  $\alpha = 90^\circ$   
(geometri *furnac* dasar)

b. *Meshing*

*Meshing* merupakan proses pembagian geometri kedalam bagian-bagian yang lebih kecil yang disebut sebagai kontrol volume. Pada tiap-tiap kontrol volume nantinya akan dilakukan berbagai perhitungan persamaan-persamaan matematis seperti konservasi massa, energi dan momentum. Kualitas dari *mesh* yang digunakan akan sangat berpengaruh terhadap seberapa valid simulasi yang dilakukan. Semakin kecil ukuran *mesh* yang digunakan maka akan semakin baik pula akurasinya. Namun, ukuran *mesh* yang kecil akan meningkatkan *computational cost*. Sehingga perlu dicari kondisi *meshing* yang tepat untuk mendapatkan hasil yang memiliki akurasi tinggi namun dengan *computational cost* yang tidak terlalu besar.

Ada beberapa parameter penting dalam *meshing* yang perlu diperhatikan, seperti *skewness* dan *orthogonal quality*. Apabila nilai *skewness* semakin mendekati 0 maka kualitas *mesh* akan semakin baik. Sedangkan untuk *orthogonal quality* dikatakan semakin baik apabila semakin mendekati 1. Untuk kriteria *skewness* dan *orthogonal quality* dapat dilihat pada gambar 3.4. Untuk penelitian tugas akhir ini digunakan pola *mesh hexagonal* dengan nilai *skewness* 0,693 dan *orthogonal quality* 0,545.

Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewn...	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.1055e-003
<input type="checkbox"/> Max	0.69377
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.54508
<input type="checkbox"/> Max	1.

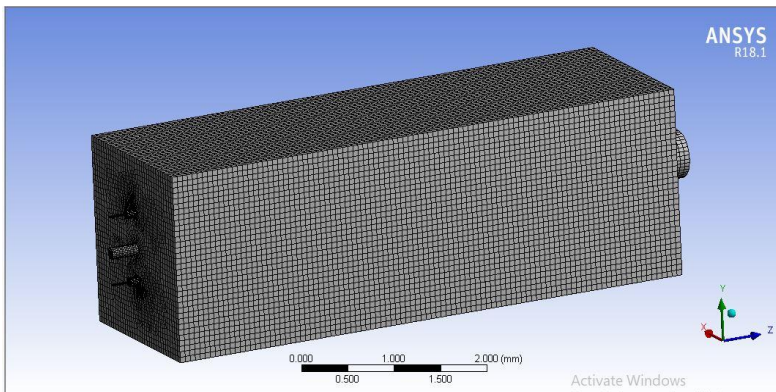
**Gambar 3. 6** Hasil kualitas skewness dan orthogonal quality  
Skewness mesh metrics spectrum:

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

**Gambar 3. 7** Kriteria kualitas skewness dan orthogonal quality



**Gambar 3. 8** Hasil *meshing* pada geometri *furnace* dengan  $\alpha=90^\circ$   
(geometri *furnace* dasar)

c. Setup simulasi

Pada tahap ini dilakukan penentuan kondisi batas untuk memodelkan pembakaran pada *furnace*. Pemilihan kondisi batas

sendiri harus tepat dan sesuai dengan kondisi lingkungan agar mendapatkan hasil yang valid. Untuk kondisi batas pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.4. Sedangkan untuk pemilihan persamaan *turbulen* yang digunakan pada penelitian ini adalah *k-epsilon standart with standard wall functions* sesuai dengan yang dilakukan oleh penelitian Yaojie Tu, dkk (2014). *K-epsilon standart* digunakan karena dapat memberikan kondisi simulasi yang mendekati kondisi aktual serta *computational cost* yang relatif rendah. Pada dinding *furnace* akan diberikan *temperature* konstan 1500°K dan *internal emissivity* 0,6. Untuk pemodelan radiasi dan absorpsi digunakan P1 model dan WSGGM (*Weighted Sum of Gray Gas Model*).

**Tabel 3. 4** Kondisi Batas

Parameter	Kondisi Batas
Inlet primer	Massflow inlet
Inlet sekunder	Massflow inlet
Outlet	Pressure outlet

**Tabel 3. 5** Persamaan Turbulen

K-Epsilon standard	
<i>Pressure Velocity Coupling</i>	SIMPLE
<i>Pressure</i>	Standard
<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Pollutant NO</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Progress Variable</i>	<i>Second Order Upwind</i>

Setelah tahap penentuan domain dan persamaan *turbulent* selesai, maka tahap selanjutnya adalah melakukan *iterasi* dari data input tersebut. Pada tahap ini, dilakukan iterasi sampai diperoleh *hail* yang konvergen. Setelah proses iterasi selesai, maka akan diperoleh hasil simulasi berupa profil *temperature* dan kecepatan serta emisi NOx yang dihasilkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Validasi Hasil Simulasi CFD

Validasi data merupakan salah satu proses yang digunakan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang dilakukan sudah mendekati kondisi aktual. Terdapat banyak metode yang dapat digunakan, seperti *grid independency*, eror parameter hasil simulasi yang dibandingkan dengan hasil eksperimen, dll. Karena pada penelitian ini tidak dilakukan eksperimen, validasi data dilakukan dengan menggunakan metode *grid independency* dan eror fraksi mol hasil simulasi yang dibandingkan dengan hasil perhitungan.

Tujuan dari dilakukan *grid independency* sendiri adalah untuk membuktikan bahwa pola *mesh* yang digunakan adalah tepat. Pola *mesh* yang tepat didapatkan dengan cara memperbanyak jumlah *elemen* pada pola *mesh* hingga didapatkan hasil eror yang kurang dari 10% (Rahmadsyah, 2016). Sedangkan pola *mesh* yang digunakan pada penelitian ini adalah *hexagonal*. Pada penelitian ini *grid independence* dilakukan dengan membuat 5 jenis *mesh* dengan jumlah *elemen* yang diperbanyak hingga hampir 2 kalinya *mesh* awal. Kemudian dilakukan simulasi pada tiap variasi *mesh* dan dilakukan pengambilan data *temperature flame*. Nilai *temperature flame* pada tiap variasi *mesh* akan dibandingkan dengan variasi *mesh* sebelumnya secara berurutan. Pada pola *mesh* yang memiliki eror paling kecil akan digunakan sebagai acuan untuk simulasi variasi selanjutnya. Pada penelitian ini, *grid independency* dilakukan ketika *ekivalen ratio* sama dengan 1 atau disebut dengan kondisi pembakaran *stoichiometric*. Hasil dari validasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

Selain itu, untuk membuktikan bahwa hasil perhitungan numerik yang dilakukan sudah benar, maka dilakukan perhitungan fraksi mol menggunakan persamaan reaksi sempurna. Apabila eror dari hasil perhitungan numerik dan perhitungan manual kurang dari 5%, maka simulasi yang dilakukan dapat dikatakan valid (Rahmadsyah, 2016). Untuk perbandingan hasil perhitungan manual dengan hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.2.

**Tabel 4. 1** Tabel hasil validasi

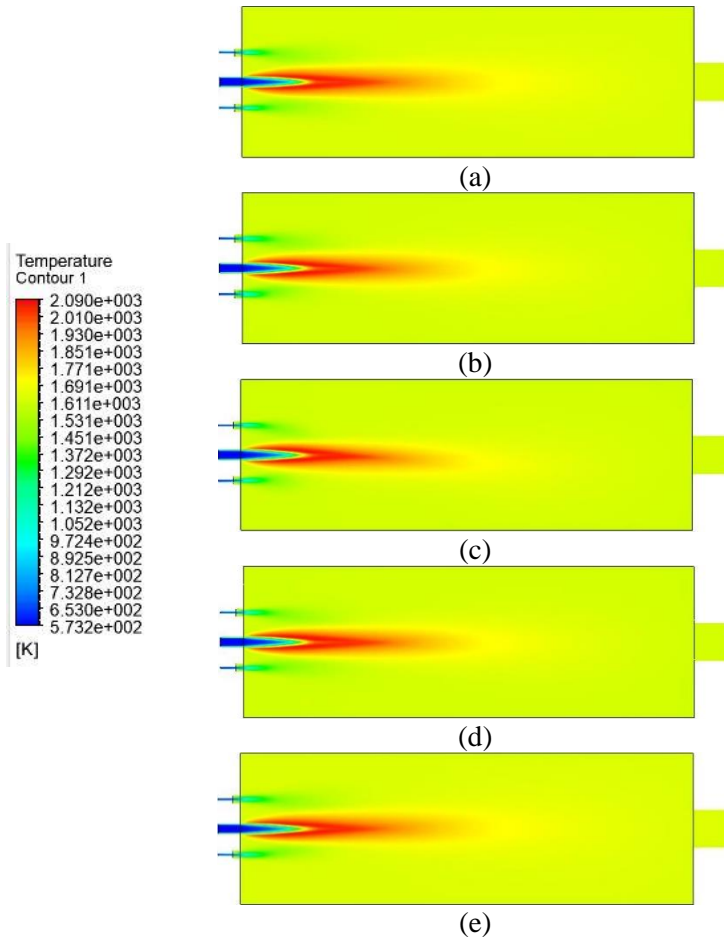
No	Variasi	Mesh Size		Skewness	Temperature (°K)	Error (%)
1	Mesh A	Node	106.441	0.87213	2056	-
		Elemen	100.645			
2	Mesh B	Node	150.421	0.66401	2076	0,97%
		Elemen	143.303			
3	Mesh C	Node	161.081	0.762	2087	0,53%
		Elemen	152.907			
4	Mesh D	Node	286.969	0.69377	2090	0,14%
		Elemen	275.377			
5	Mesh E	Node	542.878	0.795	2054	1,72%
		Elemen	524.718			

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Oberkampf, 2002) menyatakan bahwa proses validasi disebut valid apabila memiliki eror dibawah 10%. Dari tabel 4.1. diatas juga dapat dilihat bahwa semua pola *mesh* memiliki nilai *skewness* yang berada pada kategori *good* sehingga kelima pola *mesh* dapat dikatakan memiliki kualitas yang baik. Apabila ditinjau dari *error* perubahan *temperature flame* pada tiap pola *mesh*, dapat disimpulkan bahwa kelima pola *mesh* memiliki eror yang berada dibawah 10%, dimana eror terkecil berada pada pola mesh D. Sehingga pada penelitian tugas akhir ini digunakan pola *mesh* D sebagai acuan untuk simulasi selanjutnya. Sedangkan untuk kontur *temperature* data validasi pada setiap pola *mesh* dapat dilihat pada gambar 4.1.

Dari gambar 4.1. dapat dilihat bahwa pada setiap pola *mesh* memberikan kecenderungan pola kontur yang hampir sama dimana *flame point* terjauh berada disekitar radius Z sejauh 4 m. Namun



pada setiap pola *mesh* memberikan *temperature peak* yang berbeda seperti tertera pada tabel 4.1.



**Gambar 4. 1** Kontur temperatur validasi pada ekivalen ratio 1 (a) Mesh A (b) Mesh B (c) Mesh C (d) Mesh D (e) Mesh E

Pada tabel 4.2. dibawah, dapat dilihat bahwa *error* perhitungan fraksi mol hasil simulasi dan perhitungan secara manual memiliki

nilai *error* yang kurang dari 5% dimana *error* terbesar berada pada fraksi mol N<sub>2</sub> yaitu 3,08%. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian tugas akhir ini telah tervalidasi.

**Tabel 4. 2** Tabel validasi fraksi mol

Parameter	Hasil perhitungan	Hasil simulasi	Error
CO <sub>2</sub>	0,1413	0,1441	1,94%
H <sub>2</sub> O	0,2977	0,3015	1,27%
N <sub>2</sub>	0,561	0,5442	3,08%

#### 4.2. Data Hasil Simulasi Reaksi Pembakaran

Dalam penelitian tugas akhir ini, akan dibahas beberapa data yang diperoleh dari hasil simulasi CFD berupa data kuantitatif dari *temperature flame* dan *polutan NOx*, serta pola distribusi kontur berupa pola distribusi *temperature* dan kecepatan. Pola distribusi temperatur ini digunakan untuk mengetahui perubahan *temperature flame* pada jarak *axial*. Sedangkan distribusi kecepatan digunakan untuk mengetahui perbedaan pola aliran kecepatan pada masing-masing *combustion chamber shape*.

Untuk menentukan komposisi fraksi mol bahan bakar dan *oxidizer* pada masing-masing inlet pada simulasi CFD, dilakukan perhitungan analisis reaksi pembakaran. Kemudian pada *postprocessing*, akan didapatkan data *temperature flame* serta *polutan NOx* pada setiap saluran keluar (*outlet*) untuk masing-masing kondisi dan profil aliran berupa kontur temperatur serta kecepatan.

*Temperatur flame* dan *polutan NOx* merupakan variabel yang penting yang perlu ditinjau dalam penelitian mengenai pembakaran. Dalam penelitian ini akan dibahas pengaruh *combustion chamber shape* terhadap *temperatur flame* dan polutan NOx di 3 variasi *equivalen ratio* seperti yang telah ditetapkan sesuai penelitian (Li, Wang, Mi, Dally, & Mei, 2014).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Ouali, Bentebiche, & Belmlabet, 2014) mengenai pengaruh *equivalen ratio* dari natural gas dan udara terhadap *temperature* pembakaran yang dihasilkan, menunjukkan bahwa *temperature* tertinggi terdapat

pada *equivalen ratio* sama dengan satu. Semakin meningkat atau menurunnya nilai *equivalen ratio* dari satu maka akan semakin menurunkan *temperature* dikarenakan menurunnya komposisi udara atau bahan bakar didalam reaksi pembakaran.

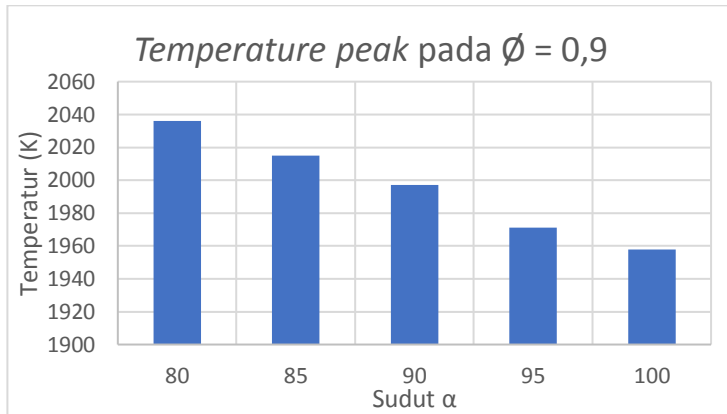
Sedangkan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Sreenivasan, Kolt, & Raghavan, 2012) mengenai tipe pembakaran *partially premixed combustion* menunjukkan bahwa dengan menggunakan tipe pembakaran *partially premixed combustion* akan memadukan konsep pembakaran *premixed* dan *non premixed* sehingga menghasilkan pembakaran dengan emisi yang rendah dan stabilitas yang tinggi. Hasil dari simulasi CFD pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4.2.

**Tabel 4. 3** Tabel hasil simulasi CFD

Variasi	Konfigurasi	Ekivalen Ratio	<i>Temperature peak</i> (°K)	NOx (ppm)
1	$\alpha = 80^\circ$	$\emptyset = 0,9$	2036	46,246
2		$\emptyset = 0,8$	1977	37,143
3		$\emptyset = 0,7$	1824	13,212
4	$\alpha = 85^\circ$	$\emptyset = 0,9$	2015	43,602
5		$\emptyset = 0,8$	1969	36,215
6		$\emptyset = 0,7$	1811	11,882
7	$\alpha = 90^\circ$	$\emptyset = 0,9$	1997	41,413
8		$\emptyset = 0,8$	1943	34,714
9		$\emptyset = 0,7$	1795	10,5
10	$\alpha = 95^\circ$	$\emptyset = 0,9$	1971	41,1456
11		$\emptyset = 0,8$	1919	31,196
12		$\emptyset = 0,7$	1772	10,295
13	$\alpha = 100^\circ$	$\emptyset = 0,9$	1958	40,308
14		$\emptyset = 0,8$	1902	30,938
15		$\emptyset = 0,7$	1755	9,29

#### 4.2.1. Pengaruh *Combustion Chamber Shape* terhadap Temperatur dan Polutan pada *Ekivalen Ratio* 0,9

Pada bagian ini akan dibahas mengenai efek *furnace chamber shape* pada variasi *ekivalen ratio* 0,9. Hasil dari simulasi CFD yang berupa data *flame temperatur* telah dipaparkan dalam gambar 4.2. berikut

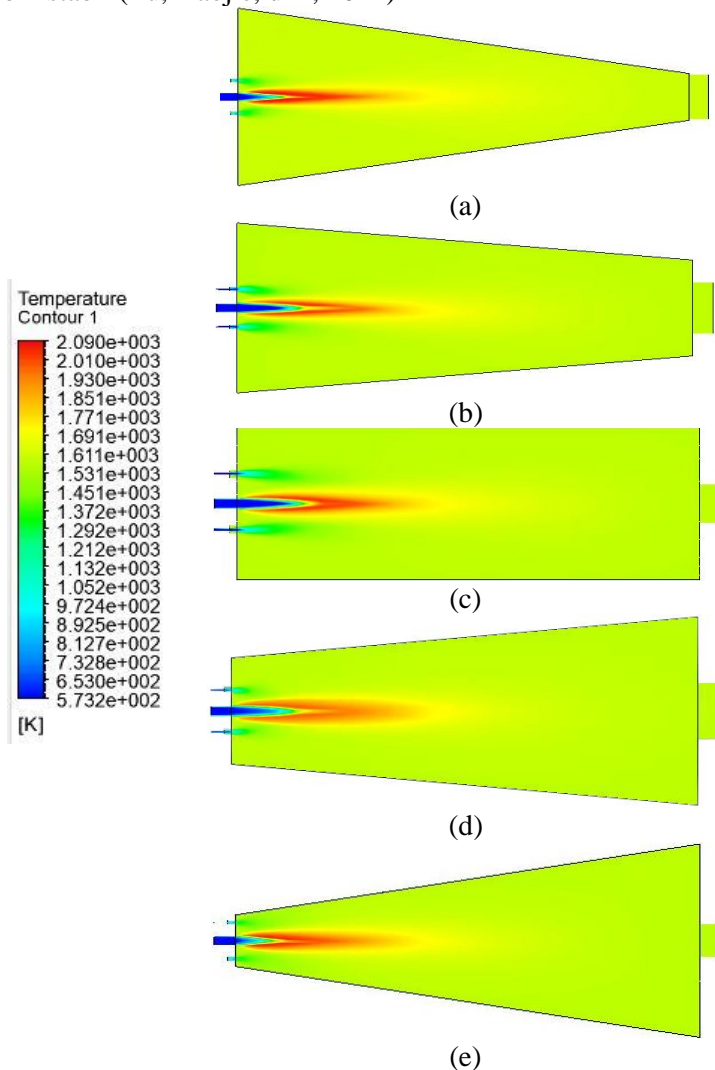


**Gambar 4. 2** Grafik temperatur pada  $\emptyset = 0,9$

Dari gambar 4.2. dapat dilihat bahwa untuk *ekivalen ratio* 0,9 *temperature peak* tertinggi yang didapatkan sebesar 2036°K yaitu pada sudut  $\alpha=80^\circ$ . Sedangkan *temperature peak* terendah didapatkan sebesar 1958°K yaitu pada sudut  $\alpha = 100^\circ$ . Sedangkan distribusi *temperature* di sepanjang *furnace* (bidang YZ) dapat dilihat pada gambar 4.3.

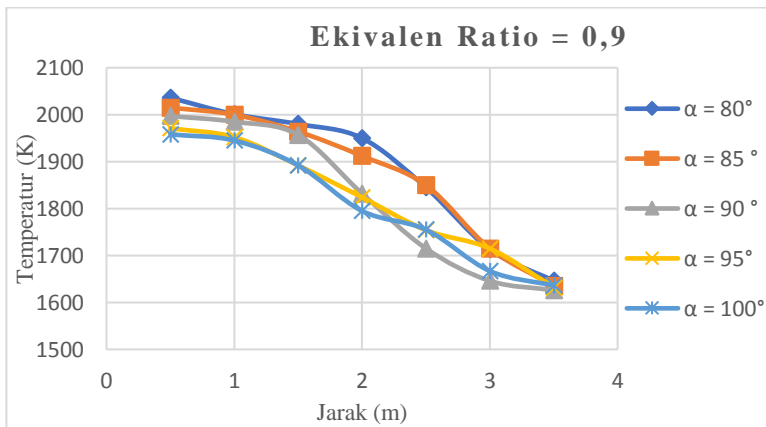
Dari gambar 4.2. dan 4.3. menunjukkan bahwa semakin besar sudut  $\alpha$  akan memberikan *temperature peak* yang semakin rendah. Pada sudut  $\alpha$  yang semakin besar, akan memperkecil luas permukaan di daerah *upstream*. Dengan luas permukaan yang semakin kecil, akan meningkatkan kecepatan di daerah *upstream*. Kecepatan yang semakin besar akan meningkatkan turbulensi di daerah *upstream* sehingga membantu memperkuat pencampuran antara bahan bakar dan udara. Peningkatan kekuatan pencampuran ini akan mempermudah mencapai kondisi *MILD Combustion* di dalam ruang pembakaran dan memberikan *temperature gradient* yang rendah. Sehingga distribusi *temperature* di dalam ruang

pembakaran menjadi lebih *uniform* serta perubahan *temperature* lebih stabil (Tu, Yaojie, dkk, 2014)



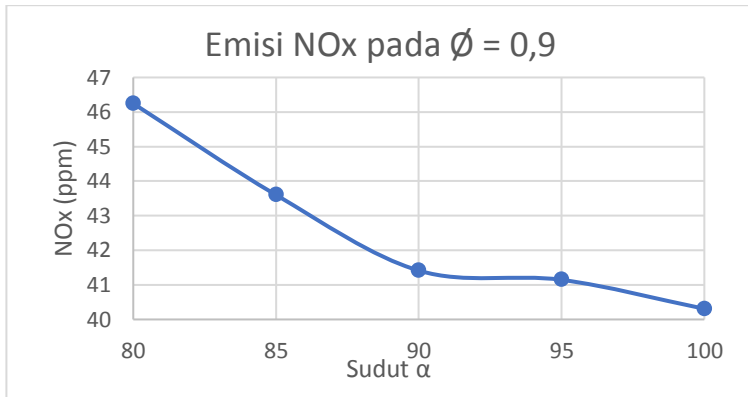
**Gambar 4. 3** Kontur temperatur pada  $\varnothing = 0,9$  (a)  $\alpha = 80^\circ$  (b)  $\alpha = 85^\circ$  (c)  $\alpha = 90^\circ$  (d)  $\alpha = 95^\circ$  (e)  $\alpha = 100^\circ$

Kemudian untuk grafik *temperature flame* di sepanjang *furnace* pada *ekivalen ratio* 0,9 dapat dilihat dari gambar 4.4. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan menggunakan *MILD Combustion* ini akan memberikan *temperature* didalam *furnace* yang *uniform* sehingga tidak ada *temperature gap* yang terlalu tinggi pada ruang pembakaran. Temperatur yang *uniform* didalam ruang pembakaran ini disebabkan oleh adanya gas resirkulasi yang memiliki temperatur yang tinggi sehingga membantu pembakaran menjadi lebih sempurna.



**Gambar 4. 4** Grafik temperature flame secara axial pada  $\varnothing = 0,9$

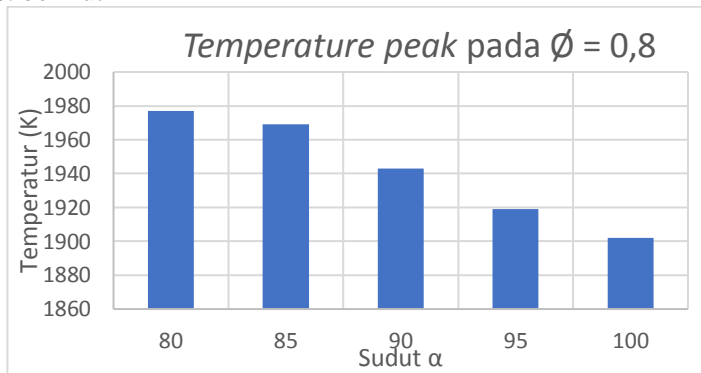
Sedangkan grafik *polutan NOx* pada *ekivalen ratio* 0,9 dapat dilihat pada gambar 4.5. Nilai polutan *NOx* yang tertinggi adalah 46,246 ppm yaitu pada saat sudut  $\alpha = 80^\circ$  dan terendah pada saat sudut  $\alpha = 100^\circ$  yaitu 40,308 ppm. Hal ini disebabkan karena dalam pembentukan *NOx* melalui *thermal NOx Pathway*, nitrogen akan lebih mudah berikatan dengan oksigen pada *temperature* yang tinggi. Sehingga semakin tinggi *temperature peak* pembakaran, maka akan menghasilkan polutan *NOx* yang semakin tinggi pula.



**Gambar 4. 5** Grafik polutan NOx pada  $\varnothing = 0,9$

#### 4.2.2. Pengaruh *Combustion Chamber Shape* terhadap Temperatur dan Polutan pada *Ekivalen Ratio 0,8*

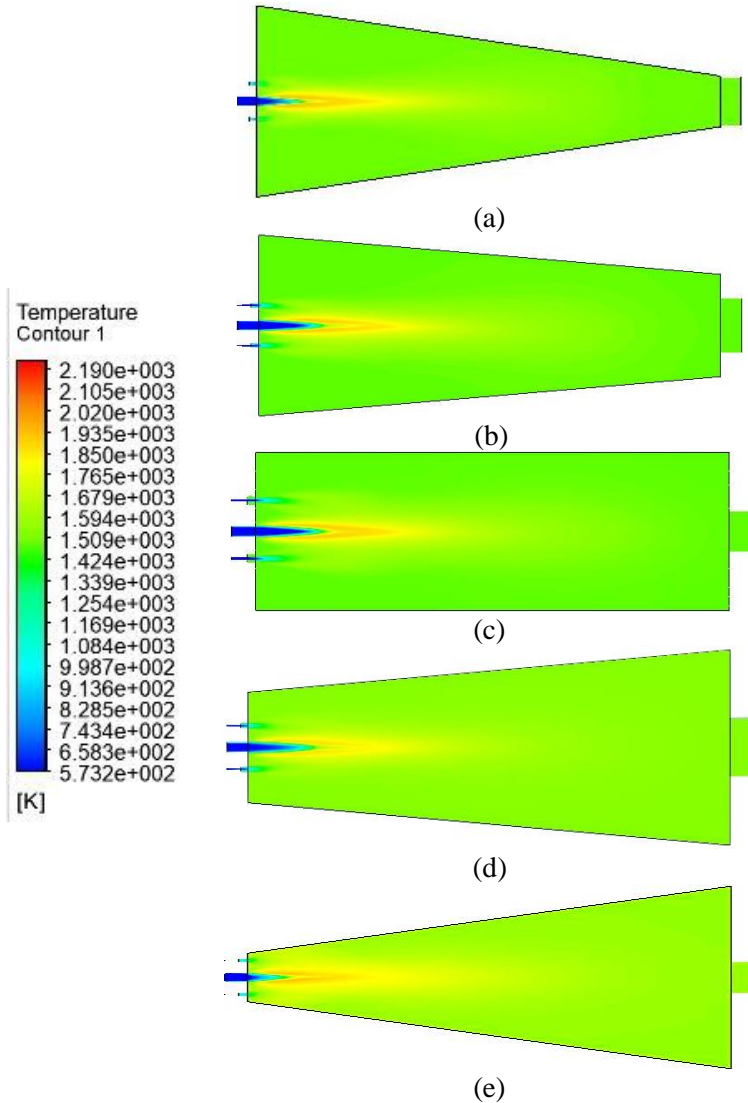
Pada variasi *ekivalen ratio 0,8* , hasil dari simulasi CFD yang berupa data *flame temperatur* telah dipaparkan dalam grafik 4.6. berikut



**Gambar 4. 6** Grafik temperatur pada  $\varnothing = 0,8$

Dari data diatas dapat dilihat bahwa untuk *ekivalen ratio 0,8* *temperatur peak* tertinggi yang didapatkan sebesar  $1977^{\circ}\text{K}$  yaitu pada sudut  $\alpha = 80^{\circ}$ . Sedangkan *temperatur peak* terendah didapatkan sebesar  $1902^{\circ}\text{K}$  yaitu pada sudut  $\alpha = 100^{\circ}$ . Dari hasil simulasi diatas dapat disimpulkan bahwa pada *ekivalen ratio 0,8*, *temperatur peak* yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan variasi *ekivalen ratio 0,9*. Sedangkan distribusi temperatur di sepanjang

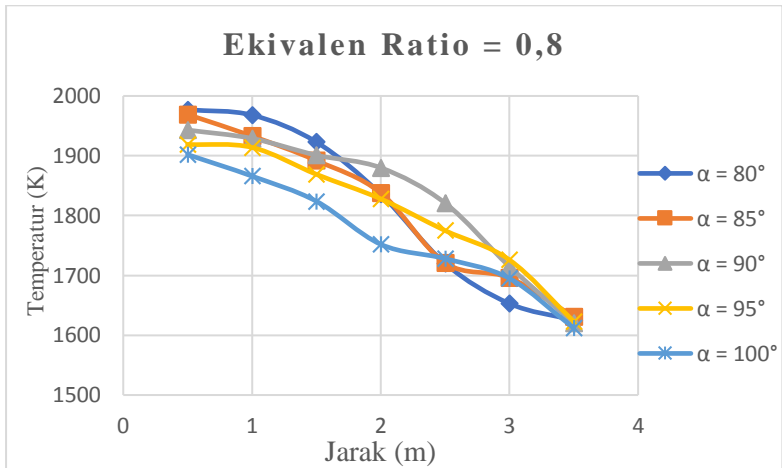
*furnace* (bidang YZ) dapat dilihat pada gambar 4.7. sebagai berikut.



**Gambar 4. 7** Kontur temperatur pada  $\varnothing = 0,8$  (a)  $\alpha = 80^\circ$  (b)  $\alpha = 85^\circ$  (c)  $\alpha = 90^\circ$  (d)  $\alpha = 95^\circ$  (e)  $\alpha = 100^\circ$

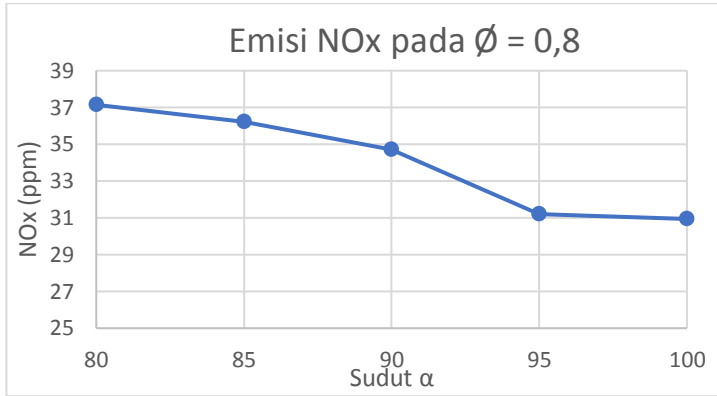


Kemudian untuk grafik *temperature flame* di sepanjang *furnace* pada *ekivalen ratio* 0,8 dapat dilihat dari gambar 4.8. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa pada variasi *ekivalen ratio* 0,8 memiliki karakteristik *temperature flame* yang sama dengan variasi *ekivalen ratio* 0,9 namun dengan *temperature peak* yang lebih rendah.



**Gambar 4. 8** Grafik temperature flame di sepanjang furnace pada  $\varnothing = 0,8$

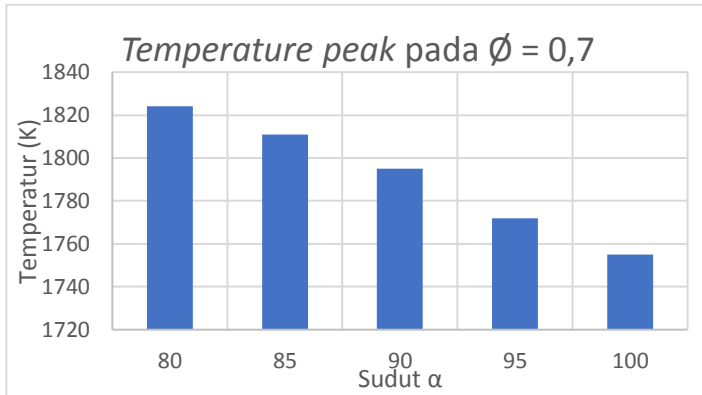
Sedangkan grafik *polutan NOx* pada *ekivalen ratio* 0,8 dapat dilihat pada grafik 4.9. Nilai polutan NOx yang tertinggi adalah 37,143 ppm yaitu pada saat sudut  $\alpha = 80^\circ$  dan terendah pada saat sudut  $\alpha = 100^\circ$  yaitu 30,938 ppm. Grafik 4.9. juga menunjukkan karakteristik yang sama dengan variasi *ekivalen ratio* 0,9 namun memiliki nilai emisi NOx yang lebih rendah dibandingkan pada variasi *ekivalen ratio* 0,9 dikarenakan *temperature flame* pada *ekivalen ratio* 0,8 yang lebih rendah dibandingkan *ekivalen ratio* 0,9.



**Gambar 4. 9** Grafik polutan NOx pada  $\varnothing = 0,8$

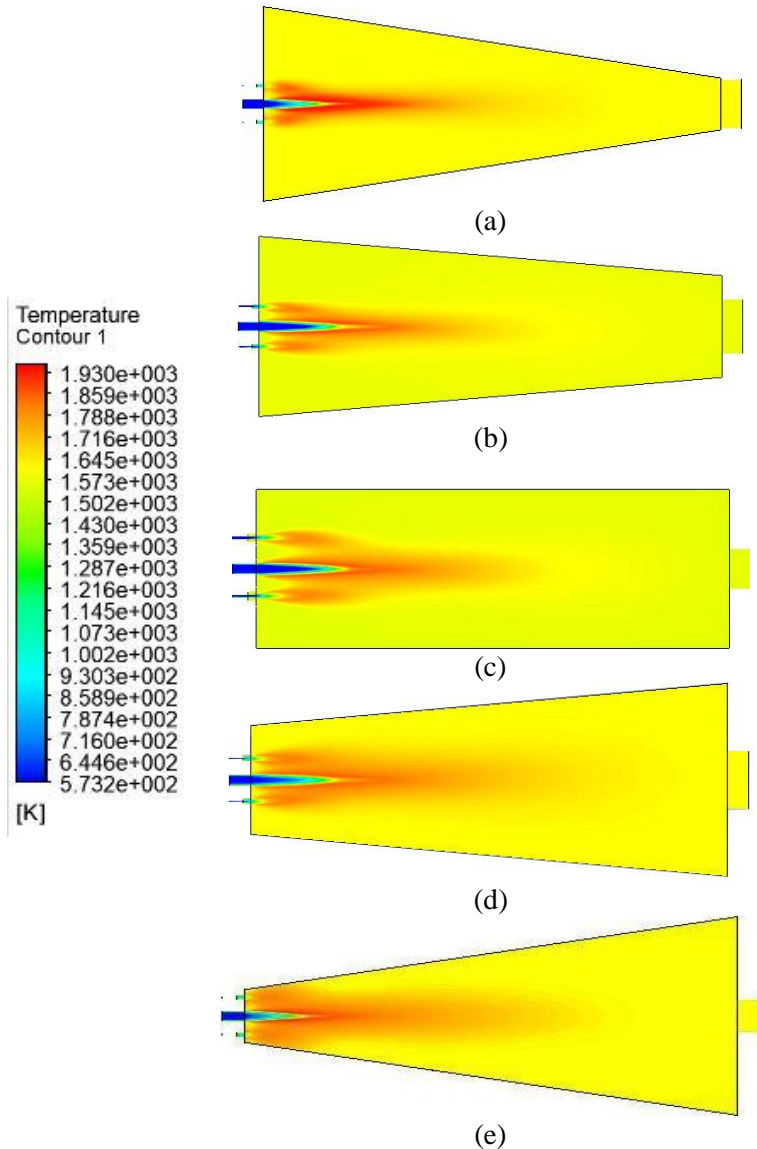
#### 4.2.3. Pengaruh *Combustion Chamber Shape* terhadap Temperatur dan Polutan pada *Ekivalen Ratio 0,7*

Pada variasi *ekivalen ratio* 0,7, hasil dari simulasi CFD yang berupa data *flame temperatur* telah dipaparkan dalam gambar 4.10. berikut



**Gambar 4. 10** Grafik temperatur pada  $\varnothing = 0,7$

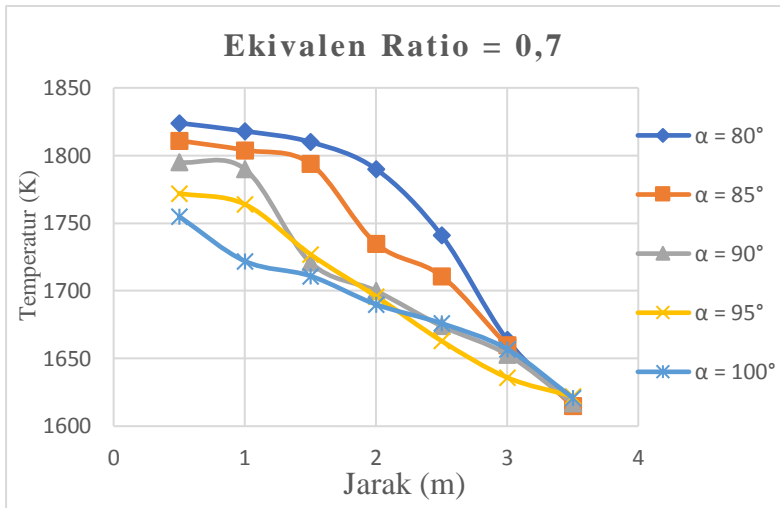
Dari data diatas dapat dilihat bahwa untuk *ekivalen ratio* 0,7 *temperature peak* tertinggi yang didapatkan sebesar 1824°K yaitu pada sudut  $\alpha=80^\circ$ . Sedangkan *temperature peak* terendah didapatkan sebesar 1755°K yaitu pada sudut  $\alpha = 100^\circ$ . Sedangkan distribusi temperatur di sepanjang *furnace* (bidang YZ) dapat dilihat pada gambar 4.11. sebagai berikut.



**Gambar 4. 11** Kontur temperatur pada  $\varnothing = 0,7$  (a)  $\alpha = 80^\circ$  (b)  $\alpha = 85^\circ$  (c)  $\alpha = 90^\circ$  (d)  $\alpha = 95^\circ$  (e)  $\alpha = 100^\circ$

Dari gambar 4.10. dan 4.11. menunjukkan bahwa data memiliki kesamaan karakteristik dengan variasi pada *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8 dimana *temperature peak* tertinggi terdapat pada sudut  $\alpha=80^\circ$  dan *temperature peak* terendah pada saat sudut  $\alpha=100^\circ$ . Namun *temperature peak* yang dihasilkan lebih rendah daripada variasi *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8.

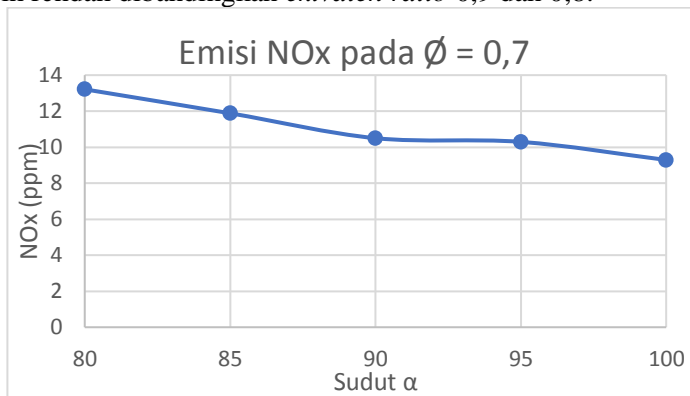
Kemudian untuk grafik *temperature flame* di sepanjang *furnace* tiap *ekivalen ratio* 0,7 dapat dilihat dari grafik 4.12. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa pada variasi *ekivalen ratio* 0,7 memiliki karakteristik *temperature flame* yang sama dengan variasi *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8.



**Gambar 4. 12** Grafik temperature flame di sepanjang furnace pada  $\text{Ø}=0,7$

Sedangkan grafik *polutan NOx* pada *ekivalen ratio* 0,7 dapat dilihat pada gambar 4.13. Nilai polutan NOx yang tertinggi adalah 13,212 ppm yaitu pada saat sudut  $\alpha = 80^\circ$  dan terendah pada saat sudut  $\alpha=100^\circ$  yaitu 9,29 ppm. Gambar 4.13. juga menunjukkan karakteristik yang sama dengan variasi *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8 namun memiliki nilai emisi NOx yang lebih rendah dibandingkan pada variasi *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8. Hal

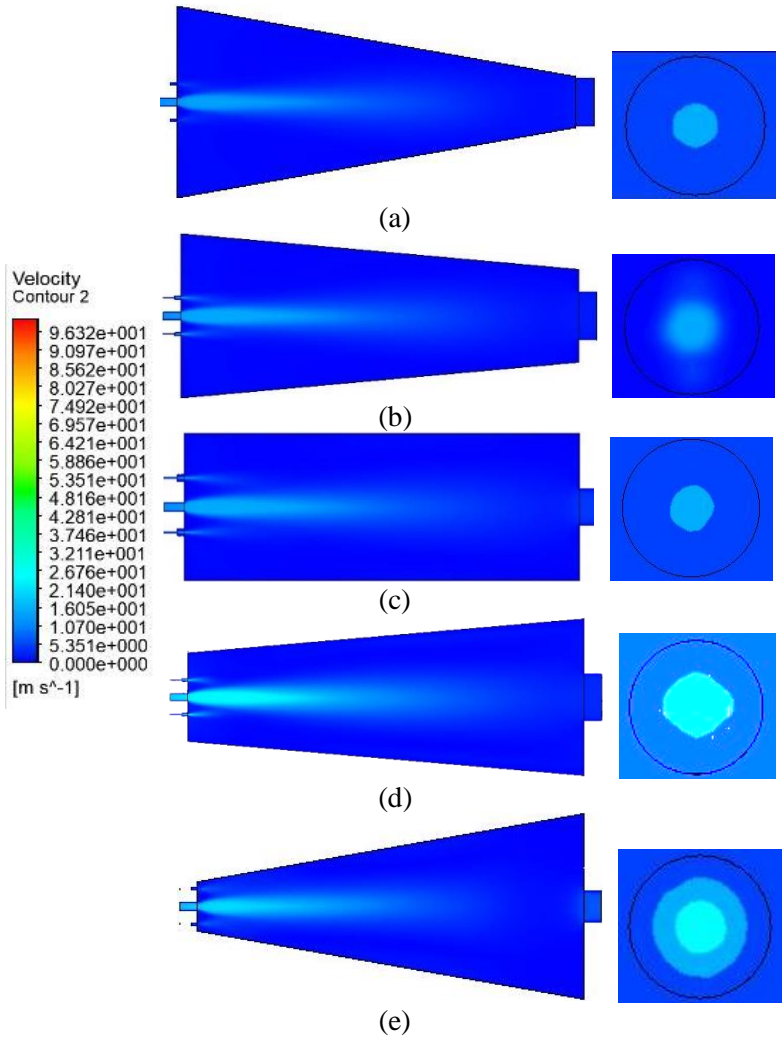
ini dikarenakan *temperature peak* pada *ekivalen ratio* 0,7 yang lebih rendah dibandingkan *ekivalen ratio* 0,9 dan 0,8.



**Gambar 4.13** Grafik polutan NOx pada  $\emptyset = 0,7$

#### 4.2.4. Distribusi Kecepatan

Pada subbab ini akan dibahas mengenai distribusi kecepatan pada setiap geometri seperti yang tercantum pada gambar 4.14. Dari gambar 4.14. dapat dilihat bahwa distribusi kecepatan juga akan semakin lebar dan semakin menjauhi daerah *upstream* seiring dengan meningkatnya sudut  $\alpha$ . Fenomena ini dapat terjadi karena pada kondisi sudut  $\alpha$  yang semakin besar, akan membantu meningkatkan kecepatan di sekitar *upstream* sehingga distribusi kecepatan dapat bergeser semakin menjauhi daerah *upstream*. Oleh karena itu, dengan meningkatkan sudut  $\alpha$  akan membantu memperkuat proses pencampuran bahan bakar dan *oxidizer* serta memperlebar daerah *mixing* bahan bakar dan udara.



**Gambar 4. 14** Distribusi kecepatan pada bidang XY pada  $z = 1\text{ m}$

## **BAB V PENUTUP**

### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan data yang telah didapatkan beserta analisis data dan pembahasan yang telah dipaparkan pada BAB IV, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah:

- a. Pada *furnace* dengan sudut  $\alpha$  yang semakin besar akan memberikan *temperature peak* yang lebih rendah. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, pada semua kondisi, pada sudut  $\alpha=100^\circ$  dapat menurunkan *temperature peak* sekitar  $70^\circ\text{K}$  dibandingkan dengan variasi geometri yang lain.
- b. Emisi  $\text{NO}_x$  yang dihasilkan bergantung dengan *temperature peak* yang dihasilkan. Semakin tinggi *temperature peak* yang didapatkan maka akan semakin tinggi pula emisi  $\text{NO}_x$  yang dihasilkan. Pada penelitian ini, emisi  $\text{NO}_x$  tertinggi yang didapatkan berada pada variasi 1 yaitu pada kondisi sudut  $\alpha=80^\circ$  dan  $\phi=0,9$  dengan emisi  $\text{NO}_x$  sebesar 46,246 ppm. Sedangkan untuk emisi  $\text{NO}_x$  terendah berada pada variasi ke 15 yaitu pada kondisi sudut  $\alpha=100^\circ$  dan  $\phi=0,7$  dengan emisi  $\text{NO}_x$  sebesar 9,29 ppm

### **5.2. Saran**

Adapun saran untuk penelitian ini adalah dengan melakukan pengembangan lebih lanjut seperti mengganti dengan tipe pembakaran yang lain serta mengganti komposisi gas resirkulasi untuk mengoptimalkan *MILD Combustion*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

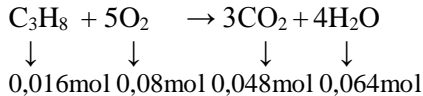
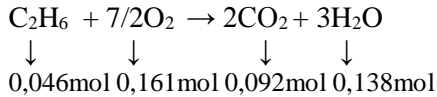
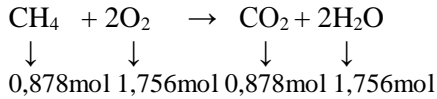
1. Aji, A. P. (2018). Analisa dan Pengaruh Swirl Number pada Conical Quarl Swirl Burner pada Jenis Partyalli Premixed Combustion dengan Menggunakan Model Large Eddy Simulations.
2. BPPT. (2015). *Teknologi, "Indonesia Energy Outlook 2015"*.
3. Cavaliere, A., & Joannon, M. d. (2004). Mild Combustion. *Elsevier*, 329-366.
4. Cavalierew, A., & Joannon, M. (2004). *MILD Combustion*.
5. E.Benini. (2013). Progress in Gas Turbin Performance.
6. Gupta, A. K. (1984). Swirl Flows. *ABACUSS Press*.
7. International Energy Agency. (2015). *World Energy Outlook*.
8. Irianto, S. K. (n.d.). Analysis of Effect of Changes in Fuel Injector Position on Gas Turbine Combustion Efficiency Using Large Eddy Simulation (LES). *International Journal of Mechanical Engineering*.
9. Lefebvre, A. H. (2010). Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions.
10. Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B., & Mei, Z. (2014). MILD Combustion Under Different Premixing Pattern and Characteristics of The Reaction Regimes. *Energy and Fuels*, 2211-2226.
11. Lieberman, N. P. (2008). *Working Guide to Process Equipment 3rd edition*. Mc GrawHill.
12. Oberkampf, W. L. (2002). Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. *Progress in Aerospace*, 209-272.
13. Oberlack, M., R, A., & Peters N. (2000). On Stochastic Damkohler Number Variations in a Homogeneous Flow Reactor. *Combust Theoty Modell*, 495-509.
14. Orsino, S., & Weber, R. (2013). Numerical Simualtion of Cinstubtion of Natural Gas with High-Temperature Air. *Combustion Science and Technology* , 1-34.
15. Ouali, S., Bentebiche, A., & Belmlabet, T. (2014). Ekvivalen Ratio Effect on Premixed Turbulent Low Swirl Stabilized Flame. *Acta Physica Polonica*, 120, 717.

16. Rahmadsyah, A. M. (2016). Penerapan Konsep MILD Combustion pada Ruang Pembakaran Turbin Gas Berbasis Computational Fluid Dynamics.
17. Schaffel-Mancini, N., Mancini, M., Szlek, A., & Weber, R. (2010). Novel Conceptual Design of Supercritical Pulverized Coal Boiler Utilizing High Temperature Air Combustion (HTAC) Technology. *Elsevier*, 2058-2060.
18. Schaffel-Mancini, N., Mancini, M., Szlek, A., & Weber, R. (2014). *jnjn*. mkk: jn.
19. Sreenivasan, R., Kolt, S. K., & Raghavan, V. (2012). Experimental Study of Effects of Coflow Air and Partial Premixing on Liquid Petroleum Gas Flames. *ISRN Thermodynamics*.
20. Tu, Y., Liu, H., Chen, S., Liu, Z., Zhao, H., & Zheng, C. (2014). Effect of Furnace Chamber Shape on The MILD Combustion of Natural Gas. *Elsevier*, 64-75.
21. Tu, Y., Liu, H., Chen, S., Liu, Z., Zhao, H., & Zheng, C. (2014). Effects of Furnace Chamber Shape on MILD Combustion of Natural Gas. *Elsevier*, 64-75.
22. Wunning, J., & Wunning, J. (1997). Flameless oxidation to Reduce Thermal NO-Formation. *Progress in Energy and Combustion Science*.

## LAMPIRAN

### I. Perhitungan *Equivalence Ratio* pada Partially Premixed

Persamaan reaksi stoikiometri adalah sebagai berikut:



Sehingga kebutuhan  $\text{O}_2$  secara stoikiometri (*excess air* 15%) adalah

$$\begin{aligned} & 1,756\text{mol} + 0,161\text{mol} + 0,08\text{mol} + 15\% \text{ molO}_2 = \\ & 1,997\text{mol} + 15\% \cdot 1,997\text{mol} = \\ & 2,29655\text{mol} \end{aligned}$$

Kandungan *oxidizer* yang digunakan :

$$\text{O}_2 \rightarrow 19,5\% \rightarrow 2,29655\text{mol}$$

$$\text{N}_2 \rightarrow 59,1\% \rightarrow 6,96031\text{mol}$$

$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\% \rightarrow 1,76657\text{mol}$$

$$\text{CO}_2 \rightarrow 6,4\% \rightarrow 0,75374\text{mol}$$

Sehingga total mol *oxidizer* yang digunakan untuk 1 mol bahan bakar adalah 11,7717mol.

Dari perhitungan diatas didapatkan hasil perbandingan massa *fuel* dan *oxidizer* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} &= \frac{11,7717\text{mol}}{1\text{mol}} \\ \left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} &= 11,7717\text{mol} \end{aligned}$$

a.  $\phi = 0,9$

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$0,9 = \frac{11,7717}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{0,929}{0,07099}$$

b.  $\phi = 0,8$

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$0,8 = \frac{11,7717}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{0,93639}{0,063607}$$

c.  $\phi = 0,7$

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$0,7 = \frac{11,7717}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{0,94389}{0,056102}$$

**II. Boundary Condition pada tiap inlet**

<b>No</b>	<b><i>Inlet</i></b>	<b><i>Massflow</i></b> <b>(kg/s)</b>	<b><i>Temperature</i></b> <b>(°K)</b>
1.	Primary Inlet	0,2305	1537
2.	Secondary Inlet	0,01305	300

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Tulungagung, 10 Nopember 1996. Saat ini penulis berdomisili di Tulungagung, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di SDN Kauman 2 (2003-2009), SMPN 1 Kauman (2009-2012), SMAN 1 Kedungwaru (2012-2015) dan pendidikan S1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan dengan menjadi asisten di Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan dari tahun 2016-2019. Penulis juga aktif sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF) selama 2 periode (periode 2016/2017 dan 2017/2018) serta penerima beasiswa Karya Salemba Empat (KSE) selama 2 tahun (periode 2017/2018 dan 2018/2019). Penulis juga pernah melakukan kerja praktek di PT Tripatra *Engineers and Constructors* pada 4 Juni – 21 Agustus 2018. Dalam kerja praktik tersebut penulis berfokus pada bidang Instrumentasi dan Control dan melakukan perancangan kontrol level pada boiler. Penulis dapat dihubungi melalui email [hanggiayiklora@gmail.com](mailto:hanggiayiklora@gmail.com).