



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI *FLAT FLAME BURNER* UNTUK PIROLISIS  
DENGAN MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)***

**SKRIPSI**

**DAVID  
0806332912**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA REGULER  
DEPOK  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI *FLAT FLAME BURNER* UNTUK PIROLISIS  
DENGAN MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DAVID**

**0806332912**


**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA REGULER  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

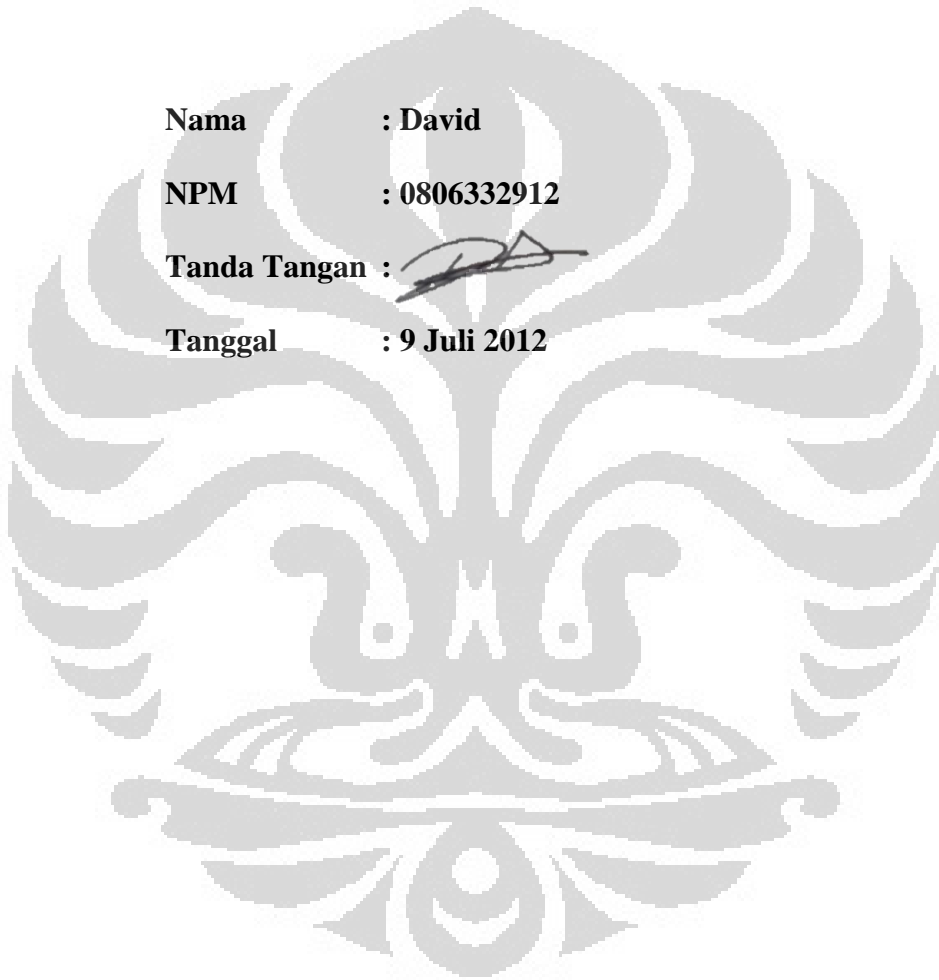
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : David

NPM : 0806332912

Tanda Tangan : 

Tanggal : 9 Juli 2012




## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : David  
NPM : 0806332912  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Simulasi *Flat Flame Burner* untuk Pirolisis dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr .rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, M.T. 

Penguji : Dr. Ir. Asep H. Saputra, M.Eng. 

Penguji : Ir. Dijan Supramono, M.Sc. 

Penguji : Ir. Abdul Wahid, M.T. 

Ditetapkan di : Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok  
Tanggal : 9 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Kuasa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Skripsi dengan judul “Simulasi *Flat Flame Burner* untuk Pirolisis dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis berterima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan oleh berbagai pihak. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Dr. rer. nat. Ir. Yuswan Muharam, MT atas bimbingan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
2. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Orang tua tercinta atas semua dukungan doa dan kasih sayang serta segala hal yang telah diberikan.
4. Chandra Hadiwijaya, Henry Septian, Jacquin Suryadi, Marcho Rizal, M. Firzi, Robbin Yonathan, dan Bernadet V.N. sebagai rekan kerja yang sudah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Kimia angkatan 2008 atas semua kerjasamanya.
6. Semua staf dan karyawan di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia atas segala bantuannya.
7. Serta berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu untuk segala kontribusinya.

Harapan penulis skripsi ini dapat bermanfaat secara keilmuan bagi setiap orang yang membacanya. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis demi tercapainya hasil yang lebih baik.

Depok, 2012

Penulis

iv

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : David  
NPM : 0806332912  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Simulasi *Flat Flame Burner* untuk Pirolisis dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics(CFD)*” beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 9 Juli 2012

Yang menyatakan



(David)

## ABSTRAK

Nama : David

Program Studi : Teknik Kimia Reguler

Judul : Simulasi *Flat Flame Burner* untuk Pirolisis dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Pada penelitian ini disimulasikan *burner* industri *non-premixed* berbahan bakar metana. *Burner* memiliki konfigurasi *wall-fired* yang bertujuan untuk menghasilkan *flat flame* dengan luas penampang yang besar untuk meradiasikan panas secara efektif ke *tube-tube* yang terdapat dalam *furnace* pirolisis. Dalam simulasi ini divariasikan geometri dan kecepatan, variasi suhu, dan variasi rasio ekivalensi yang semuanya ini mempengaruhi profil nyala dan temperatur yang dihasilkan. Untuk mensimulasikan *burner* digunakan konsep pemodelan *computational fluid dynamics (CFD)* dengan menggunakan program COMSOL *Multiphysics*. Model menggunakan laju reaksi *eddy dissipation model*, neraca massa, neraca momentum aliran turbulen  $k-\epsilon$ , dan neraca energi. Hasil penelitian masih perlu dikaji kesesuaiannya untuk proses pirolisis karena terdapat lebih dari satu pilihan geometri yang memungkinkan.

Kata kunci : *flat flame burner*, *wall-fired*, turbulen  $k-\epsilon$ , CFD

## ABSTRACT

Name : David

Major of Study : Chemical Engineering

Title : Simulation of Flat Flame Burner for Pyrolysis by Using  
Computational Fluid Dynamics (CFD)

In this research, a non-premixed industrial burner fueled with methane was simulated. Configuration of burner is wall-fired in order to produce flat flame with broad parameter to radiate heat effectively to the tubes in pyrolysis furnace. This simulation varied geometry and velocity, temperature, and equivalence ratio of combustion that all of these are known to influenced flame profile and resulted temperature. The concept of computational fluid dynamics (CFD) is used with program COMSOL Multiphysics to simulate burner. Modelling is using rate of eddy dissipation model, mass balances, momentum balances of turbulent flow  $k-\epsilon$ , and energy balance. The results of this research need to be evaluated again for real application in pyrolysis furnace for there are more than one suitable geometry founded.

Key words : *flat flame burner*, *wall-fired*, turbulent  $k-\epsilon$ , CFD



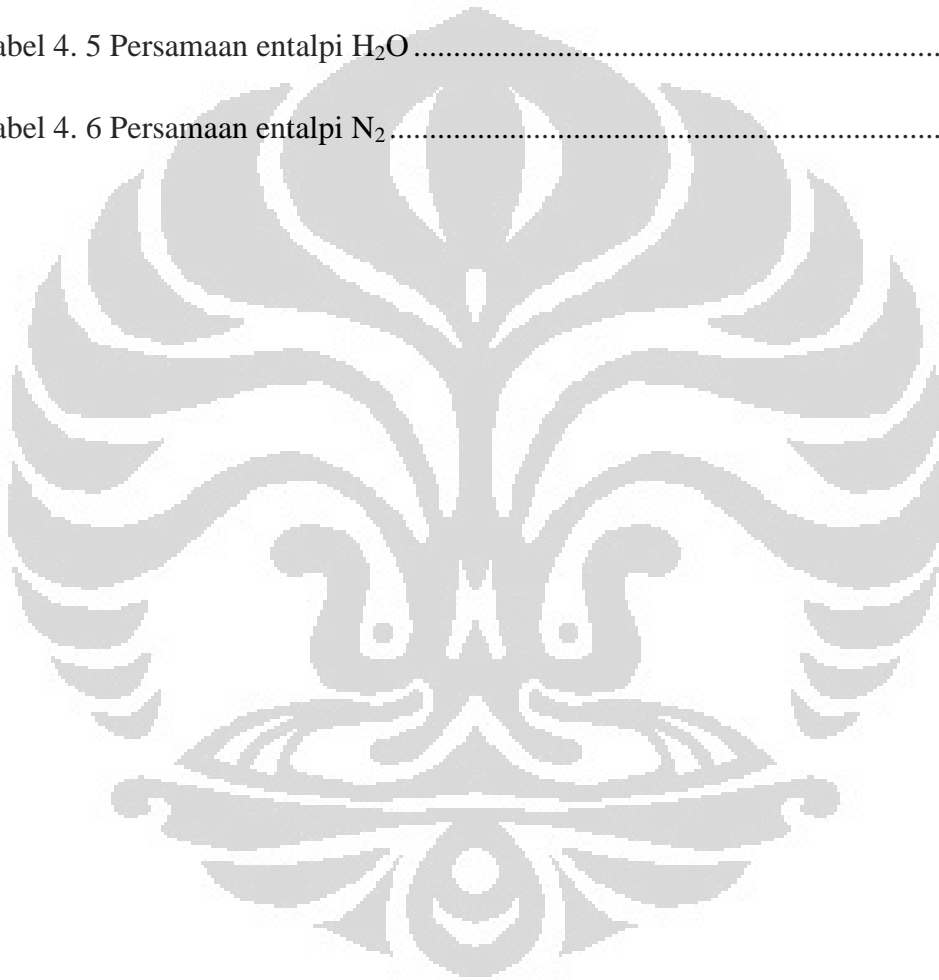
## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR SIMBOL .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1. Dasar Pembakaran.....	4
2.2. Konfigurasi <i>Burner</i> .....	6
2.3. Pemodelan Computational Fluid Dynamics (CFD) pada <i>Burner</i> .....	9
2.4. COMSOL <i>Multiphysics</i> untuk Penyelesaian Pemodelan CFD .....	13
BAB III METODE PENELITIAN .....	16
3.1. Diagram Penelitian.....	16
3.2. Prosedur Penelitian.....	17
3.2.1. Studi Literatur.....	17
3.2.2. Penentuan Batasan Model .....	17
3.2.3. Penyusunan Geometri Model .....	17
3.2.4. Verifikasi Geometri Model.....	17
3.2.5. Simulasi .....	18

3.2.6 Analisis .....	18
BAB IV PEMODELAN .....	19
4.1. Penyusunan Model Matematika .....	19
4.1.1. Neraca Massa.....	19
4.1.2. Neraca Momentum .....	19
4.1.3. Neraca Energi .....	20
4.1.4. Model Eddy Disipasi .....	21
4.1.5. Parameter Proses .....	21
4.2 Langkah-langkah Pengerjaan dalam COMSOL.....	25
BAB V HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN.....	44
5.1. Model Variasi Geometri dan Kecepatan .....	44
5.2. Model Variasi Suhu.....	55
5.3. Model Variasi Rasio Ekuivalensi .....	59
BAB VI KESIMPULAN .....	64
DAFTAR PUSTAKA .....	65
Lampiran 1. Perhitungan nilai konsentrasi awal udara untuk inputan COMSOL .....	67
Lampiran 2. Perhitungan nilai konsentrasi masukan udara dan <i>fuel</i> untuk inputan COMSOL.....	67

## DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Variasi geometri <i>flat flame burner</i> .....	30
Tabel 4. 2 Konstanta untuk simulasi <i>flat flame burner</i> .....	34
Tabel 4. 3 Persamaan untuk simulasi <i>flat flame burner</i> .....	35
Tabel 4. 4 Persamaan entalpi CO <sub>2</sub> .....	36
Tabel 4. 5 Persamaan entalpi H <sub>2</sub> O .....	36
Tabel 4. 6 Persamaan entalpi N <sub>2</sub> .....	36

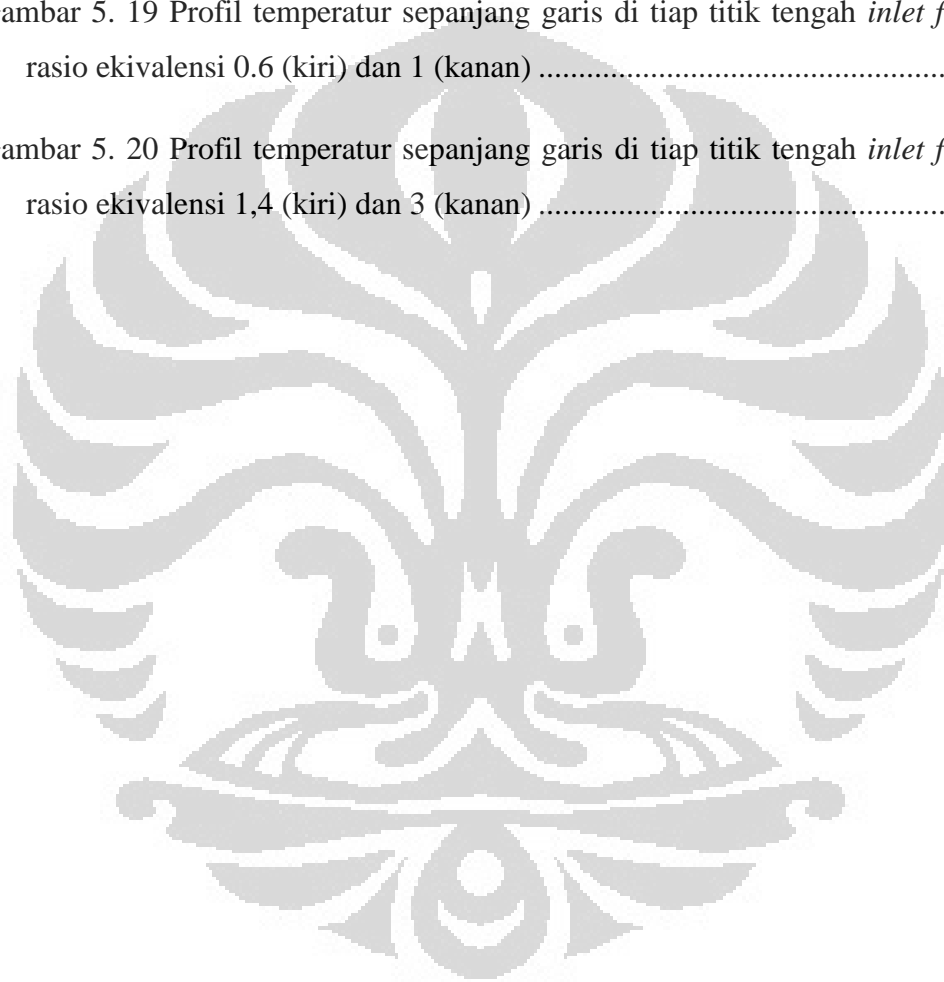


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Burner</i> gas konvensional.....	6
Gambar 2. 2 <i>Staged-fuel flat-flame burner</i> .....	7
Gambar 2. 3 <i>Wall-fired</i> (kiri) dan <i>free-standing</i> (kanan) <i>flat-flame burner</i> .....	8
Gambar 2. 4 <i>Radiant wall burner</i> .....	8
Gambar 2. 5 <i>Down-fired burner</i> .....	9
Gambar 2. 6 Tiga Komponen Kunci CFD .....	13
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	16
Gambar 4. 1 Gambaran kondisi pembakaran pada <i>furnace</i> pirolisis.....	25
Gambar 4. 2 Geometri dasar <i>flat flame burner</i> dari rujukan.....	26
Gambar 4. 3 Batasan geometri <i>furnace</i> dan <i>burner</i> tampak atas (Baukal, 2003).....	26
Gambar 4. 4 Geometri <i>furnace</i> dan <i>burner</i> tak tembus cahaya (kiri) dan transparan (kanan) .....	27
Gambar 4. 5 Dimensi <i>flat flame burner</i> 3D .....	28
Gambar 4. 6 Dimensi <i>flat flame burner</i> 2D .....	29
Gambar 4. 7 Boundary masukan udara dan <i>fuel</i> pada <i>burner</i> .....	30
Gambar 4. 8 <i>Boundary furnace</i> .....	32
Gambar 4. 9 <i>Meshing</i> Geometri.....	33
Gambar 5. 1 Profil konsentrasi CO <sub>2</sub> (kiri) dan temperatur (kanan) pada geometri 1	44
Gambar 5. 2 Isosurface konsentrasi CO <sub>2</sub> dan arah gradien konsentrasi CO <sub>2</sub> .....	45
Gambar 5. 3 Profil konsentrasi CO <sub>2</sub> (kiri) dan temperatur (kanan) pada geometri 2	46

Gambar 5. 4 Isosurface konsentrasi CO <sub>2</sub> dan arah gradien konsentrasi CO <sub>2</sub> .....	46
Gambar 5. 5 Profil temperatur geometri 2a dengan sudut <i>wing fuel</i> .....	47
Gambar 5. 6 Profil temperatur geometri 2b dengan kecepatan udara.....	48
Gambar 5. 7 Profil temperatur <i>surface</i> (kiri) dan <i>isosurface</i> (kanan) pada geometri 2b dengan kecepatan udara 42,6 m/s, kecepatan <i>main fuel</i> 21,3 m/s, dan kecepatan <i>wing fuel</i> 42,6 m/s .....	49
Gambar 5. 8 Profil temperatur pada bidang yz di posisi x titik tengah <i>wing fuel</i> (kiri) serta aliran kecepatan dari <i>wing fuel</i> dilihat dari sumbu yz (tengah) dan sumbu xz (kanan). .....	49
Gambar 5. 9 Profil temperatur <i>surface</i> (kiri) dan <i>isosurface</i> (kanan) pada geometri 3 dengan kecepatan udara dan <i>wing fuel</i> 42,6 m/s, kecepatan <i>main fuel</i> 21,3 m/s.	50
Gambar 5. 10 Profil temperatur pada bidang yz di posisi x titik tengah <i>wing fuel</i> (kiri) serta aliran kecepatan dari <i>wing fuel</i> dilihat dari sumbu yz (tengah) dan sumbu xz (kanan).....	51
Gambar 5. 11 Profil temperatur <i>surface mirror 3D</i> dan kontur pada geometri 2b (kiri) dan geometri 3 (kanan) pada kecepatan yang sama.....	52
Gambar 5. 12 Lokasi garis merah untuk analisis temperatur dimana x = 0 (kiri); x = 2,7 (tengah) dan x = 5,3; 5,2 (kanan).....	53
Gambar 5. 13 Profil temperatur sepanjang garis ditiap titik tengah <i>inlet fuel</i> pada <i>middle main fuel</i> (biru), <i>left main fuel</i> (hijau), dan <i>wing fuel</i> (merah) untuk model geometri 2b (kiri) dan model geometri 3 (kanan).....	54
Gambar 5. 14 Profil suhu pada Tudara dan <i>T<sub>fuel</sub></i> 298 K (kiri); Tudara 1200 K, <i>T<sub>fuel</sub></i> 298 K (tengah); dan Tudara 298 K, <i>T<sub>fuel</sub></i> 1200 K (kanan).....	55
Gambar 5. 15 Temperatur nyala adiabatik terhadap pemanasan udara untuk campuran stoikiometri (atas) dan terhadap pemanasan bahan bakar (bawah). (Sumber dari John Zink Co., LLC.).....	56

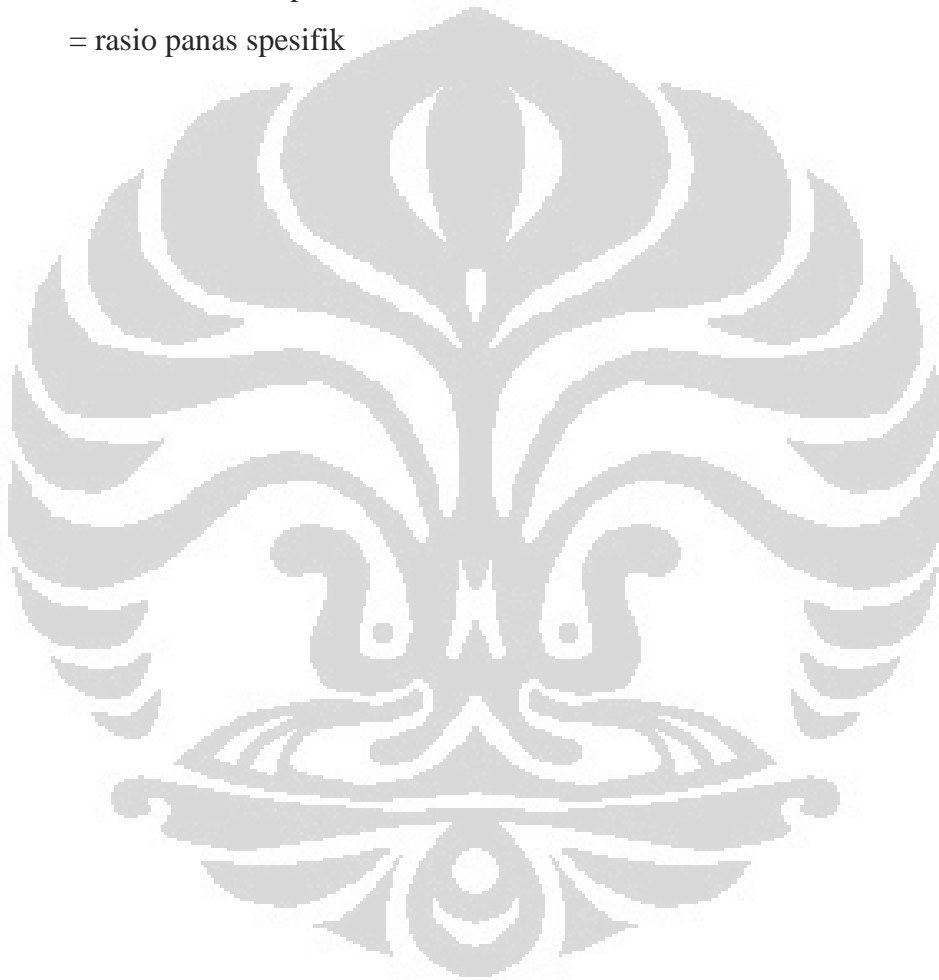
Gambar 5. 16 Lokasi garis merah untuk analisis temperatur dimana $x = 0$ (kiri); $x = 2,7$ (tengah) dan $x = 5,2$ (kanan) .....	57
Gambar 5. 17 Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah <i>inlet fuel</i> untuk model $T_{udara} = 1200$ K (kiri) dan model $T_{fuel} = 1200$ K (kanan).....	58
Gambar 5. 18 Profil temperatur geometri 3 pada rasio ekivalensi 0,6 (kiri atas); 1 (kanan atas); 1,4 (kiri bawah); dan 3 (kanan bawah).....	60
Gambar 5. 19 Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah <i>inlet fuel</i> untuk rasio ekivalensi 0.6 (kiri) dan 1 (kanan) .....	61
Gambar 5. 20 Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah <i>inlet fuel</i> untuk rasio ekivalensi 1,4 (kiri) dan 3 (kanan) .....	62



## DAFTAR SIMBOL

$A$	= koefisien model
$B$	= koefisien model
$c_j$	= konsentrasi komponen j
$\hat{C}_p$	= kapasitas panas pada tekanan konstan
$C_{p\text{ mix}}$	= kapasitas panas campuran
$C_v$	= kapasitas panas pada volume konstan
$D_i$	= koefisien dispersi
$\varepsilon$	= disipasi turbulen
$F$	= gaya bodi
$h$	= entalpi fungsi temperatur
$h^o$	= entalpi pada keadaan standar
$h_f^o$	= entalpi pembentukan pada keadaan standar
$\Delta H_f$	= selisih entalpi pembentukan
$[I]$	= konsentrasi molar komponen reaktan
$[I]W_I$	= konsentrasi molar komponen produk
$k$	= energi kinetik turbulen
$k$	= konduktivitas termal
$M_i$	= massa molekul relatif komponen i
$M_{r\text{ mix}}$	= massa molekul relatif campuran
$N_p$	= mol produk
$N_r$	= mol reaktan
$\phi$	= rasio ekivalensi
$P$	= tekanan
$\rho_i$	= massa jenis komponen i
$\rho_m$	= massa jenis campuran
$Q$	= sumber panas
$R$	= konstanta gas
$R_a$	= laju reaksi a
$t$	= waktu

- $T$  = temperatur  
 $u$  = kecepatan  
 $\mu_i$  = viskositas komponen  $i$   
 $\mu_m$  = viskositas campuran  
 $v'_{ai}$  = koefisien stoikiometri reaktan  
 $v''_{ai}$  = koefisien stoikiometri produk  
 $x_{i,j}$  = fraksi mol komponen  
 $y_i$  = fraksi mol komponen  $i$   
 $\gamma$  = rasio panas spesifik





# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebanyakan proses industri modern menggunakan pemanasan yang diperoleh dari *burner*. Pada awal 1800-an, tungku pembakaran dan oven dilengkapi secara sederhana dengan sejumlah udara dan masukan gas, kemudian kedua aliran tersebut dicampur dan dibakar didalam tungku pembakaran (Bennett, 2002). Proses ini berjalan baik untuk memperoleh suhu tungku pembakaran yang tinggi, namun pendekatan ini tidak cocok untuk berbagai aplikasi. Seringkali nyala yang dihasilkan terlalu besar, pencampuran yang lambat, dan pada gas dengan nilai kalor yang rendah seringkali nyala tidak dapat dihasilkan kecuali suhu tungku tinggi atau udara/gas diberi pemanasan awal terlebih dahulu. Kebutuhan industri untuk memperoleh pembakaran dengan proses pencampuran gas dan udara, intensitas, dan stabilitas nyala yang lebih baik menjadi salah satu faktor pemicu berkembangnya penelitian mengenai *burner* sampai sekarang. Dari penelitian yang terus berlanjut ditemukan bahwa rasio ekivalensi gas-udara dan laju alir udara-gas merupakan variabel-variabel penting untuk rekayasa pembakaran. Rasio volume berpengaruh terhadap batas flambilitas dari bahan bakar, dimana pada rasio volume udara-gas (gas bumi) sebesar 10:1 diperoleh rasio yang tepat untuk menghasilkan pembakaran yang stabil dengan kecepatan nyala yang paling optimal (Bennett, 2003). Sedangkan laju alir udara-gas sepanjang *burner* memiliki efek terhadap kondisi operasi *burner* yang mempengaruhi kecepatan maupun perambatan nyala.

Pirolisis atau *steam cracking* (perengkahan) merupakan proses yang memanfaatkan panas dari *burner* untuk memproduksi olefin dari molekul hidrokarbon (Tham, 2010). Proses ini merupakan reaksi fasa gas yang bertempat pada pipa *coil* yang terbuat dari paduan logam khusus di dalam tungku pembakaran. Reaksi perengkahan pada pirolisis bersifat sangat endotermis. Oleh sebab itu digunakan *burner non-premixed* untuk menghasilkan nyala pembakaran bersuhu tinggi yang mentransfer panas ke pipa *coil* secara radiasi.

Terdapat banyak korelasi antara dinamika fluida dan reaksi kimia pada *burner* (Bray, 1979). Untuk memperoleh dinamika fluida berupa nyala yang luas permukaannya besar untuk merambatkan panas secara radiasi pada proses pirolisis,

maka pada penelitian ini disimulasikan pembakaran pada *burner* untuk menghasilkan nyala pipih yang memiliki luas permukaan besar atau disebut *flat flame burner*. *Burner* tersebut akan dievaluasi berdasarkan perbedaan kecepatan aliran udara-gas serta bentuk geometri *burner* dengan menggunakan konsep *computational fluid dynamics* (CFD) sehingga diperoleh disain *flat flame burner* yang cocok untuk pembakaran dalam proses pirolisis. Program yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *computational fluid dynamics* adalah COMSOL.

## 1.2. Rumusan Masalah

Pada penelitian ini *burner* disimulasikan pada skala pilot dengan menggunakan COMSOL, serta digunakan persamaan reaksi *eddy-dissipation model*, neraca massa, neraca energi, dan neraca momentum. COMSOL digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai panas yang dihasilkan, pola aliran serta fenomena perpindahan panas yang terjadi pada tungku pembakaran.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh informasi pengaruh laju alir udara-gas, temperatur, serta geometri terhadap *flat flame* yang dihasilkan.
2. Memahami fenomena perpindahan panas yang dihasilkan *burner* pada tungku pembakaran.

## 1.4. Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Burner* industri yang disimulasikan adalah *burner non-premixed* berbahan bakar gas bumi dengan komposisi 100 % metana
2. *Burner* dievaluasi untuk proses pirolisis.
3. Sistem yang digunakan merupakan sistem statis (*steady state*).
4. Evaluasi yang dilakukan adalah evaluasi proses pembakaran dan bentuk *flat flame*.
5. Persamaan reaksi pembakaran yang dipakai adalah reaksi pembakaran global
6. Menggunakan reaksi *eddy-dissipation model*, neraca massa, neraca energi, dan neraca momentum

7. Koefisien difusi/dispersi pada persamaan neraca massa dianggap sangat kecil karena aliran didominasi oleh pengaruh konveksi.
8. Neraca energi hanya memperhitungkan panas konduksi dan konveksi
9. Model dan simulasi diselesaikan dengan menggunakan COMSOL
10. Model berskala pilot dengan batasan sistem satu buah *burner* yang dibagi pada batasan simetrinya di tungku pembakaran pirolisis.

### 1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan proposal ini adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**  
Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**  
Berisikan studi literatur secara umum dan khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian.
- **BAB III METODE PENELITIAN**  
Berisikan diagram alir penelitian, penjelasan diagram alir, serta langkah-langkah yang diperlukan dalam pembuatan model.
- **BAB IV PEMODELAN DAN SIMULASI**  
Menjelaskan penurunan model matematis dan langkah-langkah pengerjaan model pada COMSOL.
- **BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN**  
Menjelaskan hasil dari simulasi *flat flame burner* dan analisisnya agar diperoleh profil nyala yang cocok untuk pirolisis.
- **BAB VI KESIMPULAN**  
Berisikan mengenai kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian.

## BAB II

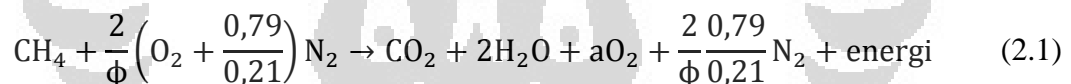
### TINJAUAN PUSTAKA

Untuk mendukung kegiatan penelitian, pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan pembakaran pada *burner*. Teori-teori ini meliputi dasar pembakaran, konfigurasi *burner*, pemodelan *computational fluid dynamics* (CFD) pada *burner*, dan COMSOL Multiphysics untuk penyelesaian pemodelan CFD.

#### 2.1. Dasar Pembakaran

Pembakaran merupakan suatu rentetan reaksi kimia eksotermis antara bahan bakar dan oksidan, yang disertai dengan produksi panas dan konversi spesi-spesi kimia. Panas yang dilepaskan menghasilkan nyala. Bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran merupakan komponen organik terutama hidrokarbon, dalam wujud gas, cair, maupun padat.

Pada reaksi pembakaran sempurna, komponen bahan bakar bereaksi dengan spesi pengoksidasi seperti oksigen atau fluor. Reaksi yang dipakai pada penelitian ini adalah reaksi pembakaran gas alam ( $\text{CH}_4$ ) dengan udara.



Dimana  $\phi$  adalah rasio ekivalensi yang akan dijelaskan pada bab selanjutnya, dan  $a$  adalah jumlah koefisien stoikiometri produk oksigen berlebih.

Berdasarkan nyala, pembakaran secara umum dapat diklasifikasikan sebagai:

1. Pembakaran konvensional; yaitu oksidasi bahan bakar yang disertai nyala atau temperatur tinggi. Contohnya adalah pembakaran metana seperti reaksi di atas.
2. Pembakaran non-konvensional; yaitu oksidasi bahan bakar yang tidak disertai nyala atau temperatur tinggi. Contohnya pada *fuel cell*.

Aspek-aspek yang mempengaruhi hasil pembakaran adalah jenis dan komposisi bahan bakar, rasio bahan bakar dan oksigen, desain sistem pembakaran, kondisi operasi (temperatur dan tekanan awal), laju alir bahan bakar dan udara, dan

aditif. Adapun aplikasi pembakaran dalam kehidupan sehari-hari sangatlah banyak, diantaranya pada turbin gas dan mesin jet, gaya dorong roket, mesin piston, senjata dan peledak, *furnace* dan *boiler*, sintesis material dengan nyala (fullerene, nanomaterial), pengolahan bahan kimia (produksi *carbon black*), pembentukan material, serta *fire hazards and safety*.

Ketidakmungkinan bahwa suatu pembakaran mencapai reaksi pembakaran sempurna mengakibatkan adanya emisi pembakaran lain yang menghasilkan polutan-polutan seperti debu partikulat, NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, serta hidrokarbon yang tidak terbakar. Dalam jumlah diatas ambang batas kesehatan, maka emisi polutan pembakaran ini dapat berbahaya bagi kesehatan.

Pada pembakaran dikenal istilah rasio ekivalensi. Rasio ekivalensi adalah rasio aktual antara bahan bakar terhadap oksidator dibandingkan dengan rasio bahan bakar terhadap oksidator dalam kondisi stoikiometri. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{(\text{rasio bahan bakar terhadap oksidator})_{\text{aktual}}}{(\text{rasio bahan bakar terhadap oksidator})_{\text{stoikiometri}}} \\
 &= \frac{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{ox}})_{\text{aktual}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{ox}})_{\text{stoikiometri}}} \\
 &= \frac{(n_{\text{fuel}}/n_{\text{ox}})_{\text{aktual}}}{(n_{\text{fuel}}/n_{\text{ox}})_{\text{stoikiometri}}}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

dimana m adalah massa, n adalah jumlah mol.

Apabila:

$\phi = 1$ , maka pembakaran yang terjadi adalah stoikiometri

$\phi < 1$ , maka campuran miskin akan bahan bakar sehingga pembakaran lebih sedikit

$\phi > 1$ , maka campuran kaya akan bahan bakar sehingga pembakaran lebih banyak

Keuntungan dari penggunaan rasio ekivalensi dibandingkan rasio bahan bakar-udara adalah rasio ekivalensi tidak memiliki ketergantungan yang sama seperti rasio bahan bakar-udara terhadap unit yang digunakan. Sebagai contoh, rasio bahan bakar-udara berbasis massa dari bahan bakar dan udara tidaklah sama dengan rasio yang dibasiskan pada jumlah mol.

## 2.2. Konfigurasi *Burner*

*Burner* adalah alat tempat terjadinya proses pembakaran dengan adanya zona mengalirnya bahan bakar maupun oksigen, dan ada zona terjadinya nyala. *Burner* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *burner* industri dengan aliran udara dan bahan bakar (gas) yang terpisah (non-premix) sebelum memasuki zona pembakaran.

*Burner* dapat diletakkan pada tungku pembakaran atau *heater floor* untuk menyala secara vertikal ke atas, pada *heater wall* untuk menyala secara horizontal, atau pada bagian atas tungku untuk menyala secara vertikal ke bawah. Pertimbangan utama yang diperlukan untuk disain *burner* adalah memastikan penyokong yang baik untuk mulut *burner* (*burner tile*).

Berikut adalah beberapa jenis konfigurasi *burner*:

### 1. *Round-Flame Burner*

*Round flame burner* merupakan disain *burner* yang paling universal dan paling banyak digunakan. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat tipikal *burner* gas konvensional yang menghasilkan bentuk nyala *round-flame*. *Burner* ini digunakan ketika emisi NO<sub>x</sub> tidak menjadi pertimbangan utama dan diinginkan nyala yang pendek.

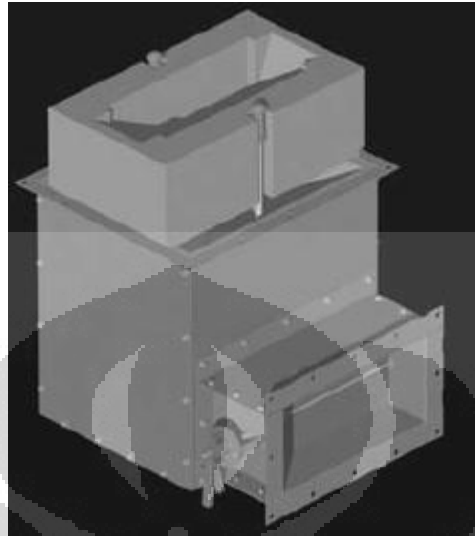


Gambar 2. 1 *Burner* gas konvensional

### 2. *Flat-Flame Burner*

Beberapa aplikasi tertentu membutuhkan *flat* atau *fan-shaped* (*rectangular*) *flame* karena *burner* dinyalakan sepanjang dinding. Gambar 2.2 menunjukkan

*staged-fuel flat-flame gas burner*. Burner ini memproduksi *free-standing flame* dan digunakan pada aplikasi dimana *process tubes* letaknya dekat dengan titik tengah burner.



**Gambar 2. 2** *Staged-fuel flat-flame burner*

Keuntungan lain dalam penggunaan *burner* tipe ini adalah penerapan *fuel staging* yang secara signifikan dapat mengurangi emisi NO<sub>x</sub>. Sesuai kapasitas nyalanya, *burner* ini dapat diutilisasikan lebih lanjut untuk menyesuaikan distribusi bahan bakar untuk memproduksi pola nyala yang diinginkan.

*Flat flame burner* dapat dipasang pada dua konfigurasi berbeda yaitu *wall-fired* dan *free-standing*. *Wall-fired flat-flame burner* mirip dengan *free-standing flat-flame burner* dimana perbedaan terletak pada instalasinya. *Wall-fired flat-flame burner* dipasang untuk menyala sepanjang dinding refraktori (Gambar 2.3 kiri). Dengan mengarahkan aliran bahan bakar menuju dinding, maka nyala api akan memanaskan dinding refraktori sehingga dapat meradiasikan panas ke *process tubes* yang menghadap dinding. *Wall-fired burner* biasanya digunakan untuk tungku pembakaran etilena (pirolisis etilen). Sedangkan *free-standing flat-flame burner* (Gambar 2.3 kanan) digunakan pada aplikasi dimana dibutuhkan nyala api pada ruang yang sempit diantara dua set *process tubes*.



Gambar 2. 3 *Wall-fired* (kiri) dan *free-standing* (kanan) *flat-flame burner*

### 3. *Radiant Wall Burner*

*Radiant wall burner* (Gambar 2.4) digunakan pula pada *cracking furnaces*. Burner ini dipasang pada dinding tungku pembakaran dan menghasilkan nyala pipih yang tipis berbentuk *circular disk*. *Burner* ini dapat dipasang pada pola-pola tertentu, yang dapat secara seragam memanaskan dinding sehingga dapat meradiasikan panas ke *process tubes* yang terletak di tengah-tengah tungku pembakaran.



Gambar 2. 4 *Radiant wall burner*

### 4. *Down-Fired Burner*

*Down-fired burner* adalah *burner* yang dipasang untuk menyala secara vertikal dari langit-langit (Gambar 2.5). *Burner* ini biasanya menghasilkan nyala berbentuk *conical*. *Burner* ini digunakan pada aplikasi seperti *hydrogen reformer* atau *ammonia reformer*.





**Gambar 2. 5** *Down-fired burner*

### **2.3. Pemodelan Computational Fluid Dynamics (CFD) pada Burner**

*Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan metode yang telah banyak digunakan untuk analisis bidang *aeronautics*, otomotif, elektronik, dan generasi tenaga listrik. Dalam perkembangannya CFD dapat pula diaplikasikan dalam berbagai proses kimia termasuk dalam analisis alat pembakaran seperti *burner* industri. Dengan CFD maka dapat dikaji parameter operasional yang sebelumnya dianggap tidak mungkin atau mencegah prosedur percobaan normal yang mahal.

Pemodelan yang digunakan pada penelitian ini adalah pemodelan *eddy-dissipation model* dan pemodelan peristiwa perpindahan yang melibatkan neraca massa, neraca energi, dan neraca momentum. Pemodelan-pemodelan pada subbab inilah yang merupakan persamaan differensial yang diinput ke COMSOL. Pemodelan tersebut dibahas sebagai berikut:

#### **1. Eddy-Dissipation Model**

Model eddy disipasi berdasarkan pada konsep bahwa reaksi kimia berlangsung sangat cepat dibandingkan dengan proses perpindahan pada aliran. Ketika reaktan bercampur pada level molekular, secara instan terbentuk produk. Model ini mengasumsikan bahwa laju reaksi dapat dikaitkan langsung dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencampur reaktan pada level molekular. Pada aliran turbulen, waktu pencampuran didominasi oleh properti *eddy*/arus, sehingga laju menjadi proporsional dengan waktu pencampuran yang didefinisikan oleh energi kinetik turbulen ( $k$ ) dan disipasi ( $\epsilon$ ).

$$rate \propto \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.4)$$

Konsep kontrol reaksi ini dapat diaplikasikan pada banyak masalah pembakaran industri dimana laju reaksi sangat cepat dibandingkan laju pencampuran reaktan.

Model *eddy* disipasi hanya berlaku untuk aliran turbulen. Pada model ini kinetik tidak mengontrol proses reaksi, sehingga ignisi dan proses dimana kinetika kimia dapat membatasi laju reaksi tidak dapat diprediksi dengan baik.

Pada model *eddy* disipasi, reaksi a ditentukan oleh nilai yang terkecil dari kedua ekspresi berikut:

a. Pembatas reaktan

$$R_a = A \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{[I]}{v'_{ai}} \right) \quad (2.5)$$

dimana:

[I] = konsentrasi molar komponen I (reaktan)

A = koefisien model

$v'_{ai}$  = koefisien stoikiometri reaktan [I]

b. Pembatas produk

$$R_a = AB \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_P [I] W_I}{\sum_P v''_{ai} W_I} \right) \quad (2.6)$$

dimana:

B = koefisien model

$[I]W_I$  = konsentrasi molar komponen produk

$v''_{ai}$  = koefisien stoikiometri produk

P berlaku untuk semua komponen produk pada reaksi elementer a.

Untuk pembakaran biasanya konstanta A bernilai 4 dan konstanta B bernilai 0,5.

Pembatas produk dapat diabaikan dengan men-set koefisien B bernilai negatif.

## 2. Neraca Massa

Fenomena-fenomena yang terjadi pada neraca massa adalah konveksi dan dispersi (aliran turbulen) dengan asumsi nilai  $D_{AB}$  yang konstan, sehingga persamaan yang digunakan adalah:

$$\underbrace{0}_{1} \frac{\partial c_j}{\partial t} + \underbrace{(\mathbf{u} \cdot \nabla c_j)}_2 = \underbrace{\nabla \cdot (D_j \nabla c_j)}_3 + \underbrace{R_A}_4 \quad (2.7)$$

dimana,

\*1 = suku akumulasi = 0 (*steady state*)

\*2 = suku konveksi

\*3 = suku dispersi

\*4 = suku generasi massa

$c_j$  = konsentrasi j

$\mathbf{u}$  = kecepatan superfisial

$D_i$  = koefisien dispersi

## 3. Neraca Energi

Fenomena-fenomena yang terjadi pada neraca energi adalah konveksi sehingga persamaan yang digunakan adalah:

$$\underbrace{0}_{1} \frac{\partial T}{\partial t} + \underbrace{\rho \hat{C}_p \mathbf{u} \cdot \nabla T}_2 = \underbrace{\nabla \cdot (k \nabla T)}_3 + \underbrace{Q}_4 \quad (2.8)$$

dimana,

\*1 = suku akumulasi = 0 (*steady state*)

\*2 = suku konveksi

\*3 = suku konduksi

\*4 = suku sumber atau penerima panas

$\rho$  = massa jenis campuran

$\hat{C}_p$  = kapasitas panas pada tekanan konstan

$T$  = temperatur

$k$  = konduktivitas termal

#### 4. Neraca Momentum (Aliran turbulen k- $\epsilon$ )

Model momentum turbulen k- $\epsilon$  didasarkan pada persamaan perpindahan energi kinetik turbulen dan persamaan laju disipasi. Fenomena-fenomena yang terjadi pada neraca momentum dipaparkan sebagai berikut:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ \underbrace{-p\mathbf{l}}_3 + \underbrace{(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)}_4 - \underbrace{\frac{2}{3} \rho k \mathbf{l}}_5 \right] + \underbrace{F}_{6} \quad (2.9)$$

dimana,

\*1 = suku akumulasi = 0 (*steady state*)

\*2 = suku momentum dari konveksi

\*3 = suku tekanan

\*4 = suku momentum dari viskositas

\*5 = suku turbulensi

\*6 = suku gaya bodi

Persamaan energi kinetik turbulen:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (2.10)$$

Persamaan laju disipasi:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = ep \quad (2.11)$$

Viskositas eddy:

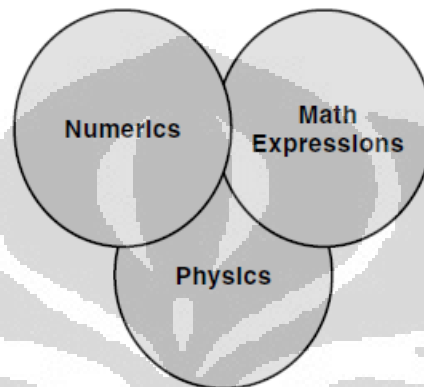
$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.12)$$

Koefisien pendekatan empiris diberikan Wilcox sebagai berikut:

$$C_{\epsilon 1} = 1,44 ; C_{\epsilon 2} = 1,92 ; C_\mu = 0,09 ; \sigma_k = 1,0 ; \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (2.12)$$

## 2.4. COMSOL *Multiphysics* untuk Penyelesaian Pemodelan CFD

CFD memiliki tiga komponen kunci (Gambar 2.6). Pertama, dalam CFD diperlukan pemahaman mendalam terhadap fenomena fisis yang terlibat dalam proses apapun. Kedua, fenomena fisis tersebut harus diterjemahkan menjadi hubungan matematis. Ketiga, akibat kompleksitas matematis non-linar, maka persamaan yang mengatur harus diselesaikan dengan algoritma numerik. Keefektifan penggunaan CFD bergantung pada tiga komponen kunci tersebut.



Gambar 2. 6 Tiga Komponen Kunci CFD

Dalam penerapan CFD untuk pemodelan burner, maka CFD dapat membantu mengurangi waktu pengembangan *burner*, meningkatkan efisiensi burner, dan memperpanjang umur pakai burner. Hal ini didukung dengan semakin murah harga alat komputasi, peningkatan kekuatan komputasi, dan semakin baik serta detailnya fenomena fisis yang dikembangkan dalam kode CFD. Adapun tujuan utama pemodelan CFD yang berkaitan dengan burner industri adalah untuk mengurangi biaya pengembangan teknologi baru.

Dalam pemodelan CFD terdapat tiga tahap utama yaitu:

### 1. Memilih *Domain*

Salah satu kunci utama dalam mengembangkan model CFD untuk burner industri adalah pemilihan *domain* yang akan dianalisis. Sebuah tungku pembakaran dengan beragam proses yang rumit pada industri penyulingan hidrokarbon dapat memiliki ratusan burner dengan disain dan konfigurasi yang bervariasi. Maka untuk mengurangi kebutuhan komputasi dalam menganalisis

suatu sistem dengan detail yang cukup, maka pendekatan dengan menggunakan bidang simetri dipakai.

## 2. Menentukan Kondisi Batas

Sebelum simulasi CFD dapat dijalankan, maka harus ditentukan terlebih dahulu kondisi pada semua batasan yang ada di sistem. Hal ini berarti harus ditentukan apa yang masuk dan keluar sistem, termasuk kondisi apa yang terjadi pada dinding sistem. Secara umum, semua kondisi batas ini harus mencakup informasi yang cukup untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial eliptik orde dua yang menggambarkan konservasi massa, momentum, dan energi.

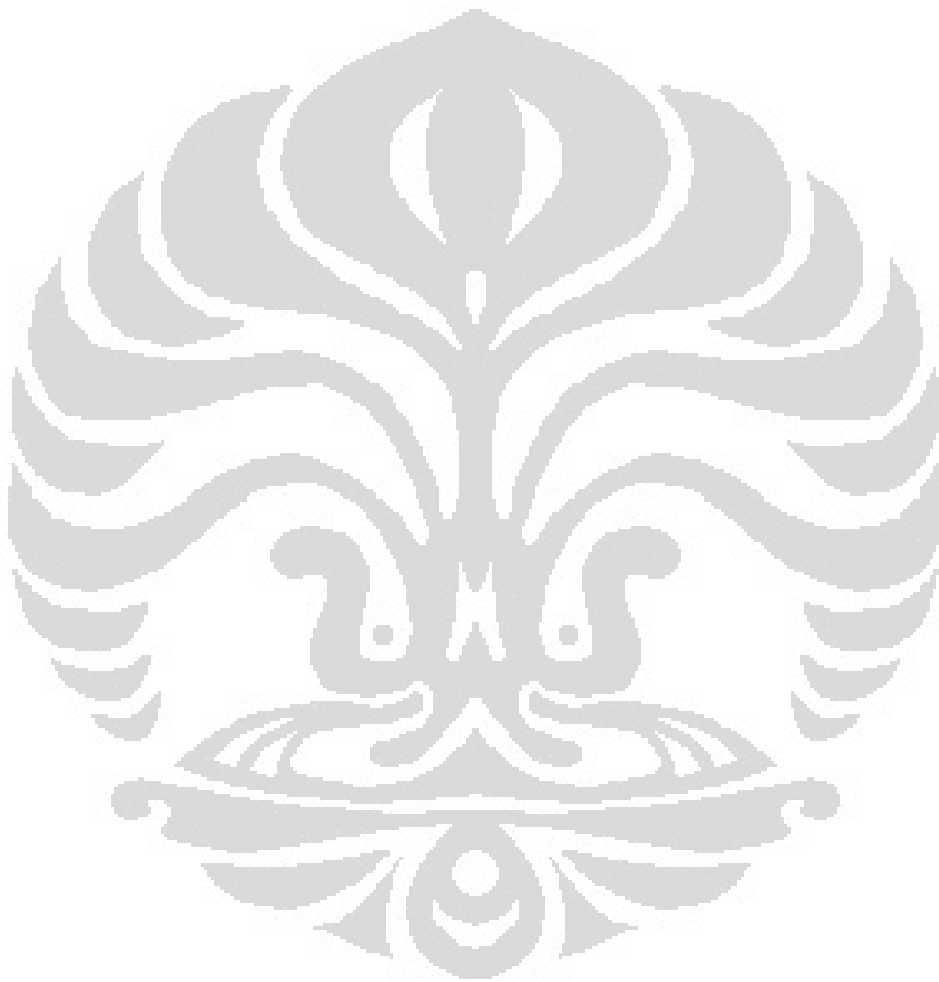
## 3. Analisis Numerik dan *Mesh* Komputasi

Untuk memperoleh hasil komputasi, maka ekspresi matematis harus disimplifikasi, akan tetapi persamaan aljabar diskrit analog yang memerlukan solusi pada titik diskrit harus merepresentasikan sub-volum spesifik diseluruh *domain* komputasi. Susunan titik diskrit tersebut biasa disebut komputasi *mesh* atau *grid* yang menghasilkan penaksiran bersegmen terhadap geometri sistem yang akan dianalisis atau disimulasikan dengan model CFD. Jumlah titik *grid* pada setiap porsi komputasi *domain* harus cukup untuk menyelesaikan fitur geometri yang penting serta fenomena fisis yang penting (lapisan batas, lapisan *shear*, zona resirkulasi, lapisan reaksi, dsb.).

Ada beberapa alasan yang mendasari penggunaan COMSOL dalam penelitian ini, yaitu: program ini merupakan program *user friendly* yang membuat penggunaanya mudah dalam memasukkan modelnya sendiri dan parameter-parameter koefisien lainnya, kondisi batas, kondisi awal dan hubungannya dengan fenomena fisika lain. Kedua, program ini dibuat berdasarkan MATLAB, sehingga seluruh kegunaan pemograman yang diperlukan untuk menyusun model bertingkat kesulitan tinggi tersedia. Ketiga, program ini berdasar pada gambar geometri dan fenomena-fenomena yang terjadi pada model tersebut.

COMSOL juga menggunakan metode *finite element* sebagai dasar perhitungan. Metode *finite element* adalah suatu teknik numeris untuk mendapatkan solusi tepat baik dari persamaan diferensial parsial maupun persamaan integral.

Solusi ini didasarkan dengan mengeliminasi seluruh persamaan diferensial (*steady state*) ataupun mengubah persamaan diferensial parsial tersebut menjadi sistem dari persamaan diferensial biasa, yang kemudian diintegrasikan secara numeris menggunakan metode Euler, Runga Kutta, dan lainnya. Oleh sebab itu COMSOL dapat menganalisis dan menyelesaikan berbagai aplikasi fisika dan teknik, terutama yang berfenomena ganda, yang dikenal sebagai *multiphysics*.

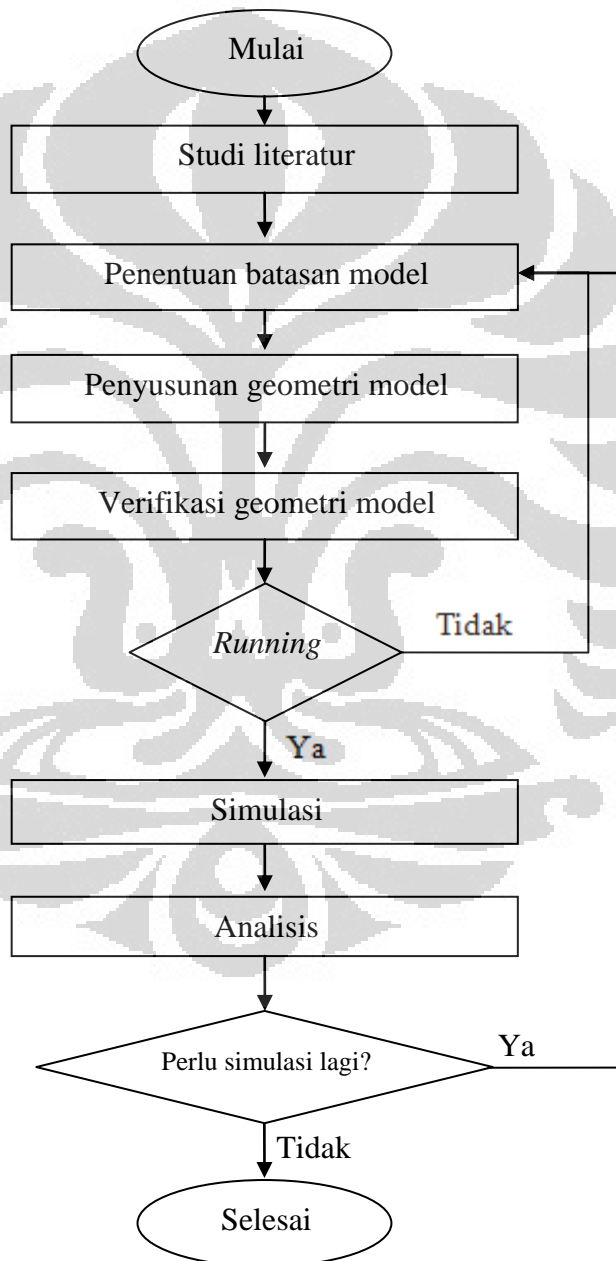


# BAB III

## METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan diagram penelitian yang digunakan pada penelitian ini beserta penjelasan-penjelasan terhadap langkah-langkah pada diagram penelitian tersebut.

### 3.1. Diagram Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



## 3.2. Prosedur Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 digunakan sebagai langkah untuk mencapai tujuan akhir dari penelitian ini yaitu memperoleh geometri dan kondisi operasi *burner* yang cocok untuk proses pirolisis

### 3.2.1. Studi Literatur

Studi literatur mengenai pengaruh geometri dan kondisi operasi (temperatur, konsentrasi, kecepatan aliran udara-gas), pemodelan *eddy* disipasi dan peristiwa perpindahan pada *burner*, CFD, serta program COMSOL *Multiphysics*.

### 3.2.2. Penentuan Batasan Model

Model pembakaran pada batasan sistem menggunakan neraca massa komponen pembakaran, neraca energi, dan neraca momentum tiga dimensi. Mekanisme perpindahan yang dipilih pada COMSOL memiliki persamaan yang sama dengan persamaan neraca massa, energi, dan momentum yang telah dipaparkan pada BAB II.

### 3.2.3. Penyusunan Geometri Model

Geometri dibuat skala pilot sesuai kondisi *furnace* pirolisis yang telah dipartisi menjadi area *furnace* untuk satu *burner* saja. Tahapan pembuatan geometri model ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan geometri *furnace*

Pada tahap ini dibuat geometri *furnace* berbentuk balok tiga dimensi.

2. Pembuatan geometri ujung burner

Pada sudut bawah *furnace*, dibuat *burner* dengan konfigurasi *burner tile* berbentuk persegi panjang untuk menghasilkan nyala *flat-flame*.

Pada tahap penyusunan geometri model ini dimasukkan berbagai persamaan yang akan dimodelkan.

### 3.2.4. Verifikasi Geometri Model

Setelah geometri model selesai disusun, langkah berikut yang dilakukan adalah verifikasi geometri model, yaitu apakah dengan geometri model yang telah dimasukkan, program COMSOL dapat dirunning. Jika ya, maka langkah-langkah

dalam metodologi penelitian ini dapat dilanjutkan. Namun jika tidak, maka kembali ke langkah penyusunan geometri model untuk memperbaiki kesalahan dalam pemasukan model ke dalam COMSOL. Kesalahan-kesalahan ini biasanya terjadi karena kesalahan tanda, adanya variabel yang belum dimasukkan, pemasukan terkaan awal (*initial value*), serta faktor satuan.

Tidak berjalannya geometri model yang telah dibuat dapat menunjukkan kemungkinan bahwa geometri yang dibuat terlalu rumit, sehingga tidak menutup kemungkinan bahwa geometri harus disederhanakan agar COMSOL dapat dirunning.

### **3.2.5. Simulasi**

Setelah melakukan verifikasi geometri model, simulasi dapat dilakukan dengan menggunakan data-data masukan temperatur, laju alir, komposisi tertentu, dan variabel-variabel lainnya.

### **3.2.6 Analisis**

Hasil variasi geometri dan kondisi operasi *burner* analisis dengan menggunakan teori-teori yang ada. Apabila setelah analisis masih diperlukan simulasi, maka tahap kembali ke penentuan batasan model dan siklus ini dapat diulang terus sampai diperoleh analisis hasil yang baik.

## BAB IV

### PEMODELAN

Bab ini berisikan langkah pemodelan yang dilakukan untuk mensimulasikan *flat flame burner*. Pemodelan ini meliputi penurunan model-model dari persamaan umum yang terdapat pada kajian teori beserta asumsi yang digunakan, pembuatan geometri pada program COMSOL serta memasukkan penurunan model tersebut dalam COMSOL.

#### 4.1. Penyusunan Model Matematika

Persamaan model matematis ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu neraca massa, neraca momentum, dan neraca energi yang akan disederhanakan dengan mengikuti fenomena-fenomena yang terjadi pada burner.

##### 4.1.1. Neraca Massa

Persamaan untuk neraca massa adalah:

$$\underbrace{(\mathbf{u} \cdot \nabla c_j)}_1 = \underbrace{\nabla \cdot (D_j \nabla c_j)}_2 + \underbrace{R_A}_3 \quad (4.1)$$

dimana \*1 merupakan suku konveksi, \*2 merupakan suku dispersi, \*3 reaksi/generasi massa. Nilai koefisien dispersi ( $D_i$ ) dibuat sangat kecil ( $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) sehingga dianggap dispersi diabaikan dan fenomena perpindahan lebih dikontrol oleh kecepatan konveksi.

##### 4.1.2. Neraca Momentum

Model momentum turbulen k- $\epsilon$  didasarkan pada persamaan perpindahan energi kinetik turbulen dan persamaan laju disipasi. Fenomena-fenomena yang terjadi pada neraca momentum dipaparkan sebagai berikut:

$$\underbrace{\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_1 = \nabla \cdot \left[ \underbrace{-p\mathbf{l}}_2 + \underbrace{(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)}_3 - \underbrace{\frac{2}{3} \rho k \mathbf{l}}_4 \right] + \underbrace{F}_{5} \quad (4.2)$$

dimana,

\*1 = suku momentum dari konveksi

\*2 = suku tekanan

\*3 = suku momentum dari viskositas

\*4 = suku turbulensi

\*5 = suku gaya bodi

Persamaan energi kinetik turbulen:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\epsilon \quad (4.3)$$

Persamaan laju disipasi:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = ep \quad (4.4)$$

Viskositas eddy:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.5)$$

Koefisien pendekatan empiris diberikan Wilcox sebagai berikut:

$$C_{\epsilon 1} = 1,44 ; C_{\epsilon 2} = 1,92 ; C_\mu = 0,09 ; \sigma_k = 1,0 ; \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (4.6)$$

### 4.1.3. Neraca Energi

Fenomena-fenomena yang terjadi pada neraca energi adalah konveksi sehingga persamaan yang digunakan adalah:

$$\underbrace{\rho \hat{C}_p \mathbf{u} \cdot \nabla T}_1 = \underbrace{\nabla \cdot (k \nabla T)}_2 + \underbrace{Q}_3 \quad (4.7)$$

dimana,

\*1= suku konveksi

\*2 = suku konduksi

\*3 = suku sumber atau penerima panas

$\rho$ = massa jenis campuran

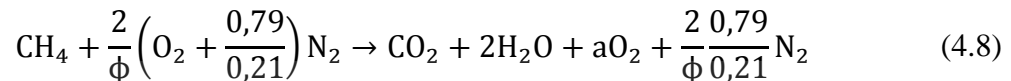
$\hat{C}_p$  = kapasitas panas pada tekanan konstan

$T$  = temperatur

$k$  = konduktivitas termal

#### 4.1.4. Model Eddy Disipasi

Digunakan reaksi pembakaran global:



Pada model *eddy* disipasi, reaksi  $a$  ditentukan oleh nilai yang terkecil dari kedua ekspresi berikut:

a) Pembatas reaktan

$$R_a = A \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{[I]}{v'_{ai}} \right) \quad (4.9)$$

dimana:

$[I]$  = konsentrasi molar komponen I (reaktan)

$A$  = koefisien model

$v'_{ai}$  = koefisien stoikiometri reaktan  $[I]$

b) Pembatas produk

$$R_a = AB \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_P [I] W_I}{\sum_P v''_{ai} W_I} \right) \quad (4.10)$$

dimana:

$B$  = koefisien model

$[I]W_I$  = konsentrasi molar komponen produk

$v''_{ai}$  = koefisien stoikiometri produk

$P$  berlaku untuk semua komponen produk pada reaksi elementer  $a$ .

#### 4.1.5. Parameter Proses

Selain penurunan persamaan serta kondisi batas, ada beberapa parameter proses yang perlu diketahui dalam bentuk konstan maupun persamaan. Variabel-variabel ini bergantung pada suhu, tekanan serta konsentrasi, sehingga agar

mencapai hasil yang akurat, variabel-variabel tersebut harus dicantumkan dalam model. Variabel-variabel terikat ini meliputi:

– Entalpi (Cengel, 5<sup>th</sup>Ed)

Pada model ini rumus entalpi yang dipakai mengikuti persamaan untuk perhitungan temperatur nyala adiabatik, sehingga ketika tercapai temperatur nyala adiabatik tersebut maka tidak ada lagi panas yang digenerasi.

$$\sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p = \sum N_r \bar{h}_{f,r}^o \quad (4.11)$$

yang bila disederhanakan menjadi:

$$\text{Heat of reaction } (T) = \Delta H_f(298) + \sum N_p (\bar{h}(T) - \bar{h}(298))_p \quad (4.12)$$

Nilai  $\Delta H_f(298)$  yang dipakai adalah -802.3 kJ/mol karena nilai ini dihitung untuk kondisi air di fasa uapnya. Suku kedua disebelah kanan tanda sama dengan pada persamaan 3.11 merupakan entalpi produk yang nilainya mengikuti NASA *polynomials*. Dari persamaan ini produksi panas akan berkurang seiring dengan meningkatnya suhu nyala sehingga tidak ada lagi panas yang diproduksi pada kondisi setimbang atau ketika mencapai temperatur nyala adiabatik.

Persamaan entalpi fungsi suhu menurut NASA *polynomials* adalah:

$$\frac{H}{RT} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + \frac{a_6}{T} \quad (4.13)$$

– Viskositas (Coulson, 2005)

Viskositas adalah pengukuran dari ketahanan fluida yang dapat dideformasi oleh tegangan geser dan tegangan tensil. Semakin besar viskositasnya, suatu bahan akan lebih sulit mengalir dibandingkan dengan bahan yang memiliki viskositas rendah.

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_i y_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}} \quad (4.14)$$

dimana,

$\mu_m$  = viskositas campuran

$\mu_i$  = viskositas komponen  $i$

$y_i$  = fraksi mol komponen  $i$

$M_i$  = massa molekul relatif komponen  $i$

Pada model ini viskositas dihitung konstan yaitu untuk produk pembakaran CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub> kondisi stoikiometri pada suhu 1900 °C. Nilai viskositas tiap gas diperoleh dari "*Calculation of the Viscosity of Gas Mixtures* (Krieger, 1951)".

– Densitas (Persamaan Gas Ideal)

Densitas bahan didefinisikan sebagai massa dari bahan tersebut dibagi dengan volumenya. Densitas dari gas ideal adalah:

$$\rho_b = \frac{pM}{RT} \quad (4.15)$$

dimana,

$\rho_b$  = densitas

$p$  = tekanan

$M$  = massa molekul relatif

$R$  = konstanta ksetimbangan gas

Pada model ini densitas dihitung konstan yaitu untuk produk pembakaran CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub> kondisi stoikiometri pada suhu 1900°C dan tekanan 1,014 bar. Penggunaan densitas dan viskositas yang konstan diperlukan agar komputasi tiap fenomena fisis bisa dilakukan satu per satu, dimana tahap pertama komputasi adalah perhitungan neraca momentum turbulen yang memerlukan data parameter densitas dan viskositas yang tidak terkait dengan fraksi mol, konsentrasi, dan suhu dalam sistem.

– Kapasitas Panas (Coulson, 2005)

Kapasitas panas adalah pengukuran dari suatu energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur. Semakin besar kapasitas panas suatu bahan, semakin tinggi energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur.

$$Cp_{mix} = \frac{Cp_i x_i + Cp_j x_j}{Mr_{mix}} \quad (4.16)$$

dimana,

$Cp_{mix}$  = kapasitas panas campuran

$Cp_{i,j}$  = kapasitas panas komponen

$x_{i,j}$  = fraksi mol komponen

$Mr_{mix}$  = massa molekul relatif campuran

Nilai kapasitas panas dibuat dalam fungsi waktu yang datanya diperoleh dari Perry.

– Konduktivitas Termal (Coulson, 2005)

Konduktivitas termal suatu bahan menentukan kemampuan bahan tersebut untuk mengalirkan panas. Konduktivitas panas dapat menentukan daya yang hilang yang melewati suatu bahan.

$$k = \mu_m \left( C_p + \frac{5R}{4M} \right) \quad (4.17)$$

dimana,

$k$  = konduktivitas termal

$\mu_m$  = viskositas campuran

$C_p$  = kapasitas panas

$R$  = konstanta gas

$M$  = massa molekul relatif

– Rasio Panas Spesifik (Jensen, 2003)

Rasio panas spesifik ( $\gamma$ ) untuk campuran gas ideal didefinisikan sebagai:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{(C_p \times M_r) - R} \quad (4.18)$$

dimana,

$C_p$  = kapasitas panas pada tekanan konstan

$C_v$  = kapasitas panas pada volume konstan

$R$  = konstanta gas

$M_r$  = massa molekul relatif



## 4.2 Langkah-langkah Pengerjaan dalam COMSOL

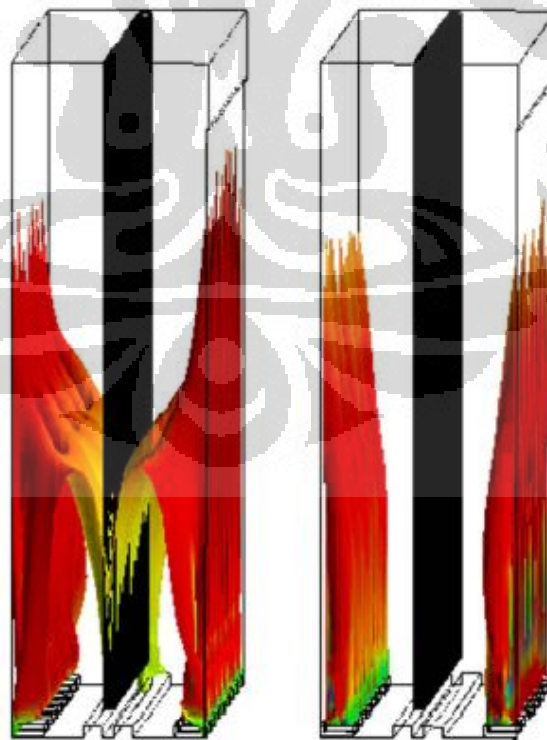
Simulasi *flat flame burner* untuk pirolisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL.

- Pemilihan Fenomena Fisis

Fenomena fisis yang dipilih pada model adalah "*Transport of Diluted Species*", "*Turbulent Flow k-ε*", dan "*Heat Transfer in Fluids*".

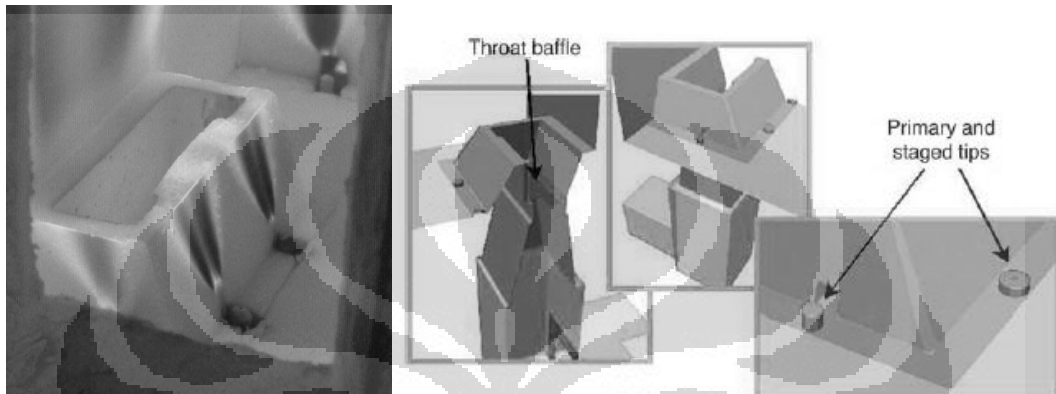
- Pembuatan Geometri dan Meshing

Kondisi umum pembakaran pada *furnace* pirolisis dengan *flat flame burner* dapat dilihat pada Gambar 4.1, dimana terdapat burner yang disusun secara paralel dengan nyala yang dihasilkan menghadap tube-tube pirolisis (berwarna hitam pada gambar) yang disusun berdampingan. Gambar sebelah kiri di Gambar 4.1 merupakan kondisi pembakaran yang nyalanya mengenai tube-tube pirolisis, dimana fenomena ini biasa disebut *flame rollover*. Fenomena ini ingin dihindari, dan profil bentuk nyala *flat flame* yang diinginkan adalah yang terlihat pada gambar sebelah kanan di Gambar 4.1.

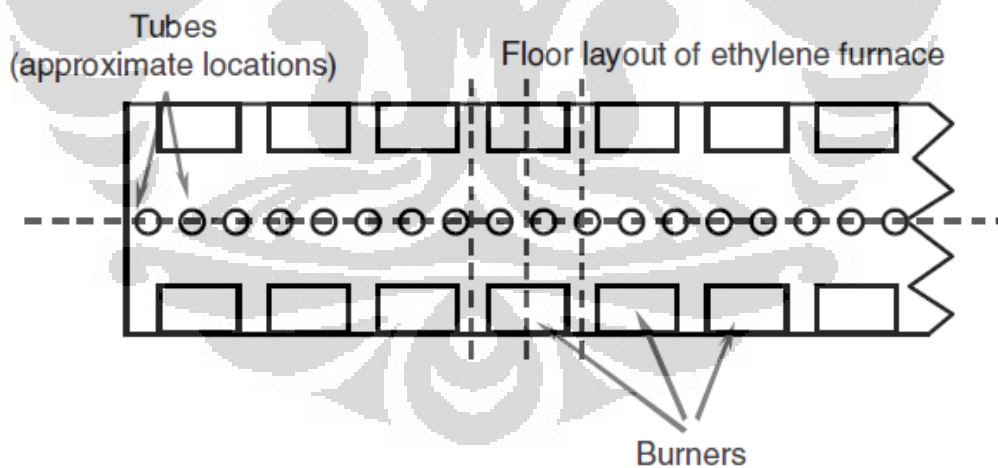


**Gambar 4. 1** Gambaran kondisi pembakaran pada *furnace* pirolisis  
(*Reaction Engineering International*)

Geometri *burner* dirujuk dari contoh kasus pemodelan *flat flame burner* pada buku "*Industrial Burners Handbook*" halaman 184 s.d. 187 (Charles E. Baukal, 2003). Dari contoh kasus tersebut diketahui geometri dasar *flat flame burner* sesuai pada Gambar 4.2, dimana batasan geometri *furnace* dan *burner* dapat dilihat pada Gambar 4.3 yang merupakan tampilan tampak atas dari Gambar 4.1.

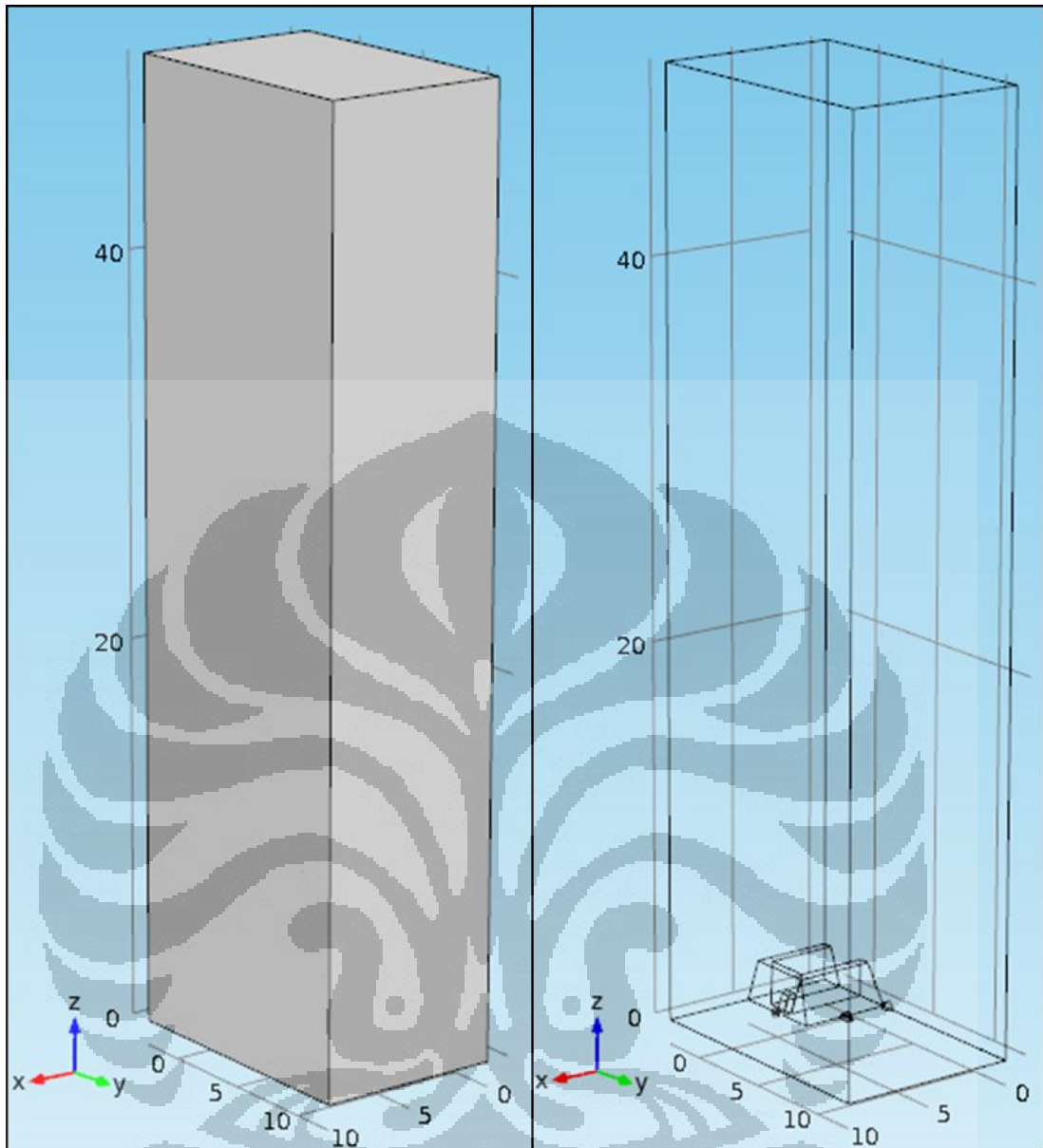


**Gambar 4. 2** Geometri dasar *flat flame burner* dari rujukan "*Industrial Burners Handbook*" halaman 185 (Baukal, 2003)



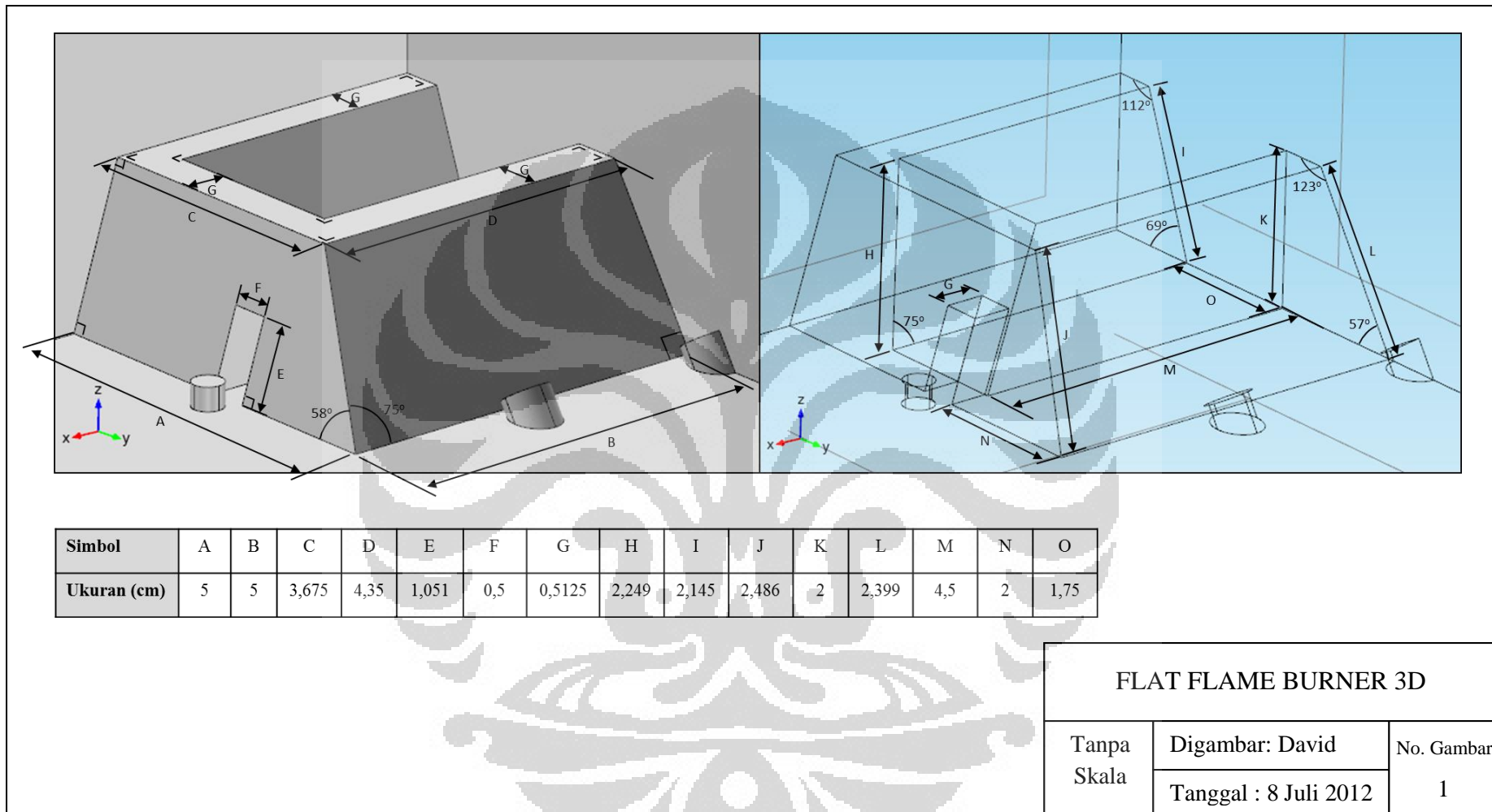
**Gambar 4. 3** Batasan geometri *furnace* dan *burner* tampak atas (Baukal, 2003)

Geometri tersebut disederhanakan dan dibuat tiga dimensi dalam bentuk kotak *furnace* berisi burner yang dibagi dua mengikuti kondisi batas simetri untuk meringankan proses komputasi. *Furnace* dan *burner* dibuat pada skala pilot. Ukuran *furnace* adalah 10 x 15 x 50 cm. Geometrinya dapat dilihat pada Gambar 4.4.

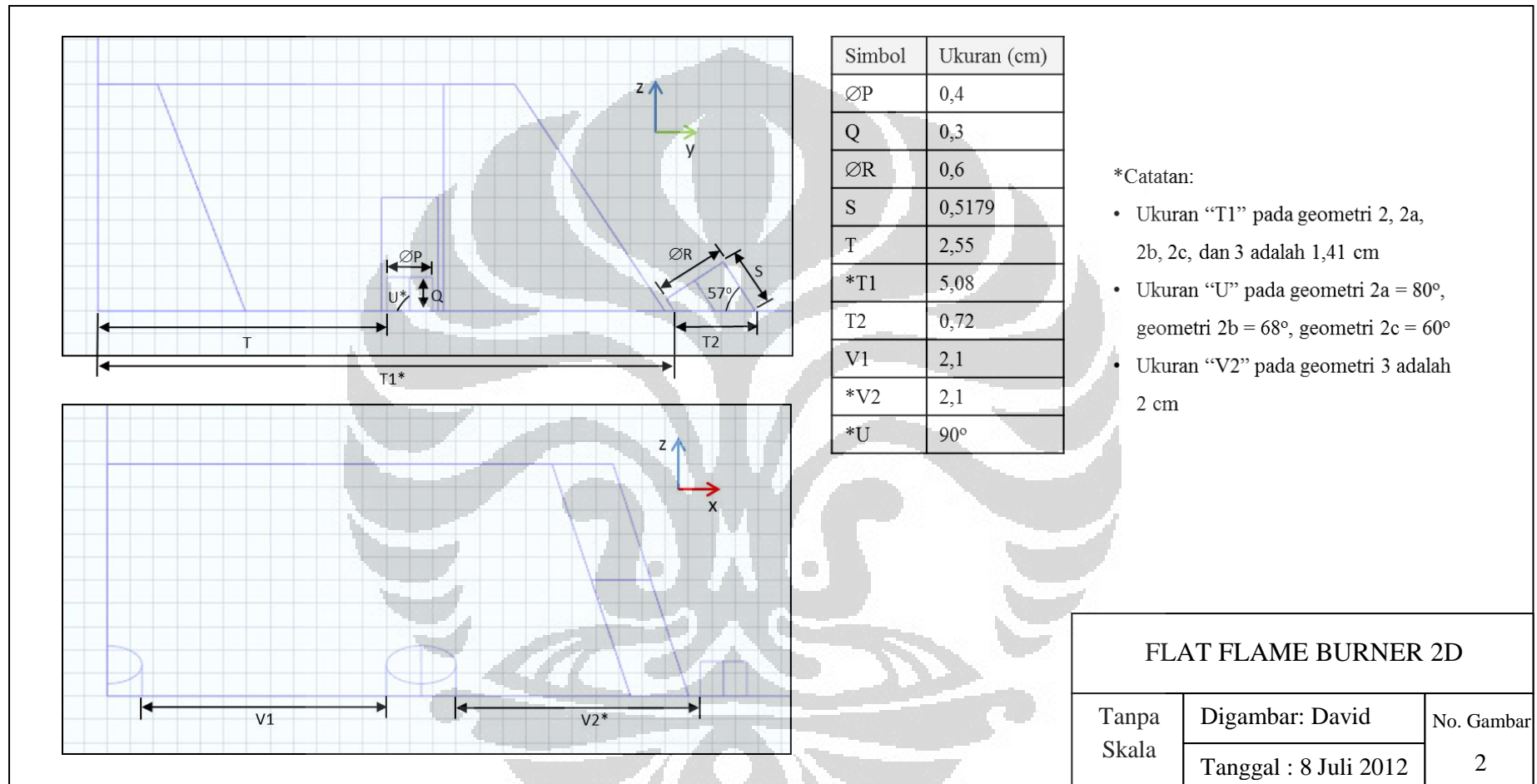


**Gambar 4. 4** Geometri *furnace* dan *burner* tak tembus cahaya (kiri) dan transparan (kanan)

Dimensi detail geometri *flat flame burner* dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Gambar 4.5 menunjukkan geometri *flat flame burner* 3D tak tembus pandang dan transparan, sementara Gambar 4.6 menunjukkan geometri *flat flame burner* 2D pada sumbu *yz* dan *xz*. Nantinya akan digunakan enam variasi geometri yaitu geometri 1, 2, 2a, 2b, 2c, dan 3. Gambar 4.5 dan 4.6 menggambarkan dimensi geometri 1, sedangkan dimensi geometri lainnya dicantumkan pada catatan Gambar 4.6.

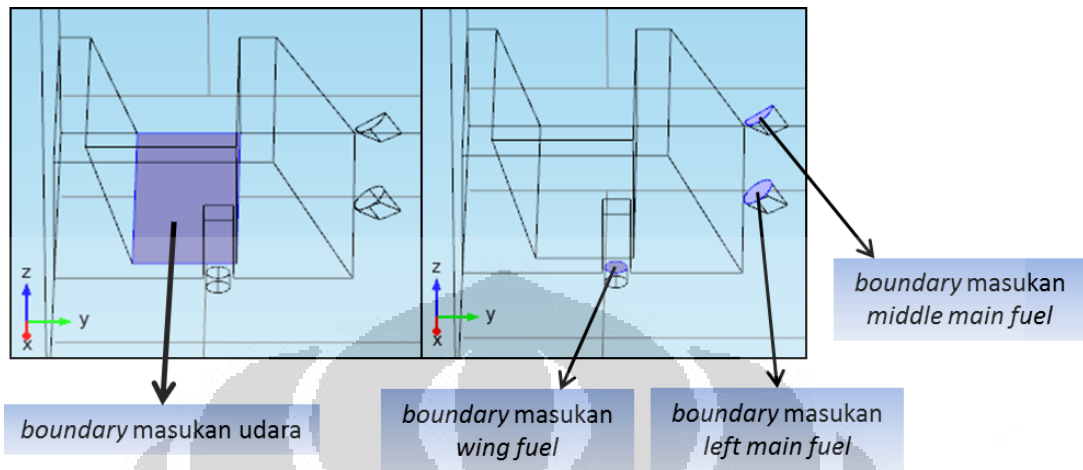


Gambar 4. 5 Dimensi flat flame burner 3D



Gambar 4. 6 Dimensi flat flame burner 2D

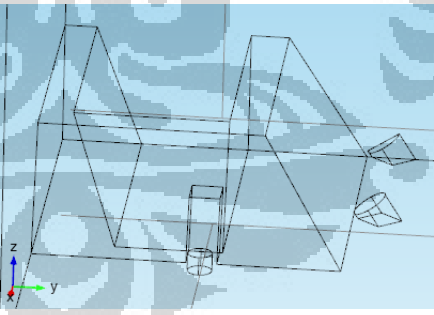
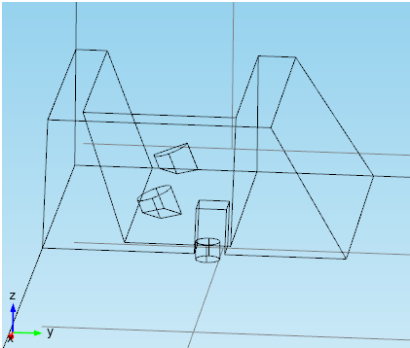
Selanjutnya pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 digambarkan *boundary* pada *furnace* dan *burner* yang nantinya akan menjadi inputan kondisi batas pada tiap fenomena fisis di COMSOL.

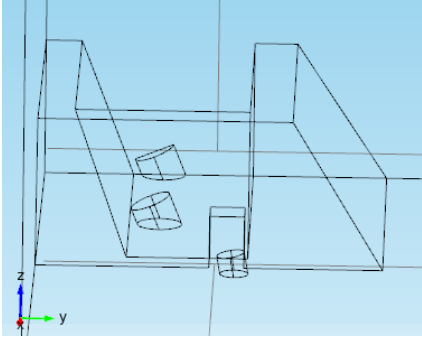
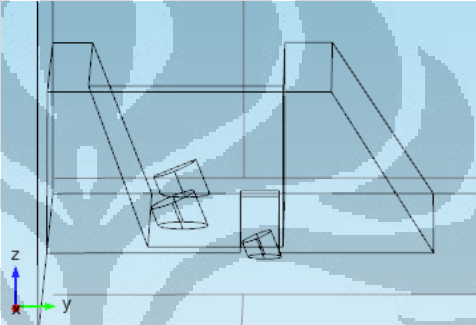
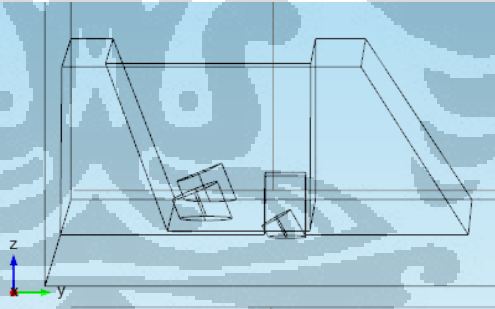
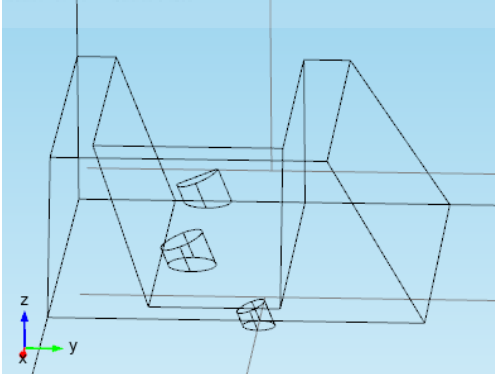


**Gambar 4. 7** Boundary masukan udara dan *fuel* pada *burner*

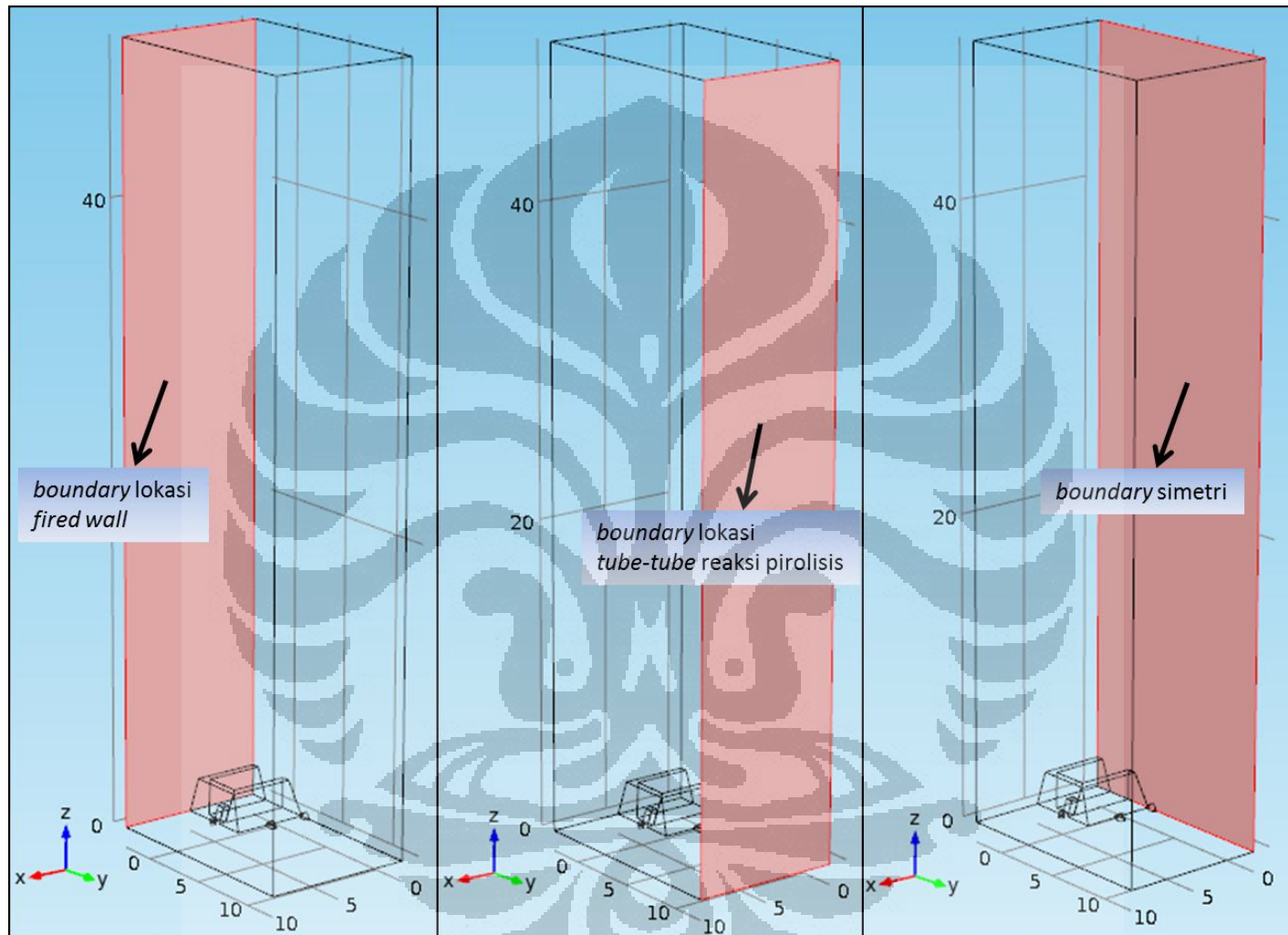
Kemudian pada Tabel 4.1 ditunjukkan variasi geometri *burner*. Variasi geometri ini diperoleh dari hasil analisis tiap simulasi geometri.

**Tabel 4. 1** Variasi geometri *flat flame burner*

Geometri 1	<p>Geometri dasar dari rujukan "<i>Industrial Burners Handbook</i>"</p> 
Geometri 2	<p><i>Main fuel dipindahkan dekat fired wall</i></p> 

Geometri 2a	<p style="text-align: center;">Sudut <i>wing fuel</i> <math>80^\circ</math></p> 
Geometri 2b	<p style="text-align: center;">Sudut <i>wing fuel</i> <math>68^\circ</math></p> 
Geometri 2c	<p style="text-align: center;">Sudut <i>wing fuel</i> <math>60^\circ</math></p> 
Geometri 3	<p style="text-align: center;">Lubang samping keluaran udara ditutup, sudut <i>wing fuel</i> <math>68^\circ</math></p> 

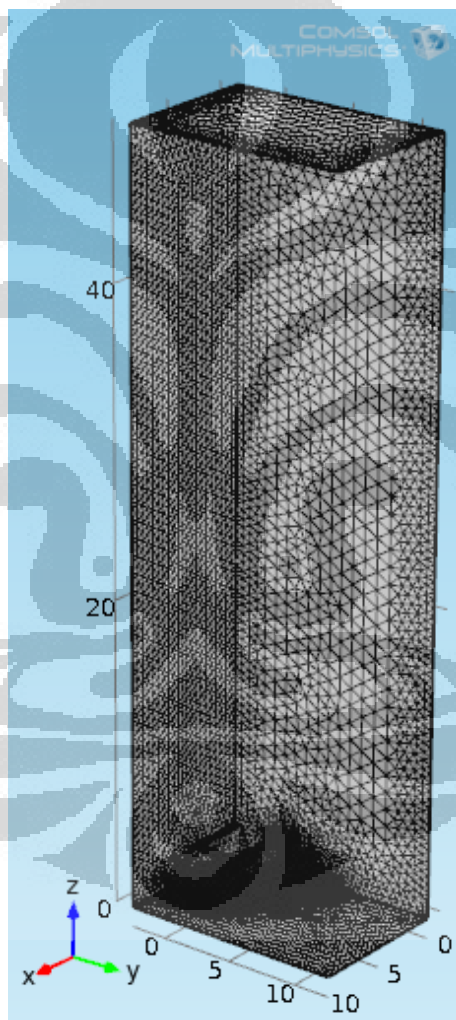




Gambar 4. 8 Boundary furnace



Langkah selanjutnya adalah melakukan *meshing* pada geometri yang telah dibuat. *Meshing* adalah diskretisasi model menjadi elemen-elemen pada penyelesaian dengan menggunakan metode elemen hingga. Semakin banyak elemen yang terdapat pada model, semakin halus gambar yang dihasilkan, dan semakin rumit penyelesaian model tersebut. *Meshing* dilakukan otomatis dengan pilihan *reset to physics-induced sequence* pada menu di COMSOL. *Domain* atau luasan objek yang lebih kecil secara otomatis akan memiliki *mesh grid* yang lebih banyak sehingga perhitungan lebih rinci terjadi pada area dekat objek tersebut, dimana dalam hal ini adalah *domain burner* itu sendiri.



**Gambar 4.9** *Meshing* Geometri

- Penyusunan Konstanta dan Persamaan

Setelah membuat geometri, langkah selanjutnya adalah menentukan konstanta-konstanta dan persamaan-persamaan variabel sifat fisik fluida yang

akan digunakan pada model. Konstanta dan persamaan dimasukkan bersamasama pada menu *variable*. Persamaan yang dimasukkan untuk model adalah laju reaksi eddy disipasi, panas reaksi, fraksi mol komponen, massa molekular campuran gas, kapasitas panas komponen, kapasitas panas campuran gas, konduktivitas campuran gas, dan rasio panas spesifik campuran gas.

**Tabel 4. 2** Konstanta untuk simulasi *flat flame burner*

<i>Name</i>	<i>Expression</i>	<i>Description</i>
deltaHf	-802.275[kJ/mol]	Entalpi pembakaran
Mr_ch4	16[kg/kmol]	Berat molekul metana
Mr_o2	32[kg/kmol]	Berat molekul oksigen
Mr_co2	44[kg/kmol]	Berat molekul karbondioksida
Mr_h2o	18[kg/kmol]	Berat molekul air
Mr_n2	28[kg/kmol]	Berat molekul nitrogen
T_burned	2173[K]	Suhu pembakaran konstan
x_co2b	0.095	Fraksi co2 stoikiometri
x_h2ob	0.19	Fraksi h2o stoikiometri
x_n2b	0.715	Fraksi produk n2 stoikiometri
pb	1.014[bar]	Tekanan <i>furnace</i>
Mr_mixb	$(x\_co2b*Mr\_co2)+(x\_h2ob*Mr\_h2o)+ (x\_n2b*Mr\_n2)$	Mr produk konstan
dens	$pb*Mr\_mixb/R\_const/T\_burned$	Densitas produk konstan
sqrt_Mr_co2	6.6332[kg/mol]	Akar Mr co2
sqrt_Mr_h2o	4.2426[kg/mol]	Akar Mr h2o
sqrt_Mr_n2	5.2915[kg/mol]	Akar Mr n2
miu_mix	$((miu\_co2*x\_co2b*sqrt\_Mr\_co2)+(miu\_h2o*x\_h2ob*sqrt\_Mr\_h2o)+(miu\_n2*x\_n2b*sqrt\_Mr\_n2))/ ((x\_co2b*sqrt\_Mr\_co2)+(x\_h2ob*sqrt\_Mr\_h2o)+(x\_n2b*sqrt\_Mr\_n2))$	Viskositas campuran gas konstan

**Tabel 4. 3** Persamaan untuk simulasi *flat flame burner*

<i>Name</i>	<i>Expression</i>	<i>Description</i>
R_EDM	$4 * \epsilon_p / k * \min(c_{ch4}, \min(c_{o2} / 2, 0.5 * (c_{co2} + c_{h2o}) / 3))$	Laju reaksi
H_T	$\Delta H_f + (h_{co2}(T[1/K]) + 2 * h_{h2o}(T[1/K]) + 2 * 3.77 * h_{n2}(T[1/K]))(h_{co2}(298) + 2 * h_{h2o}(298) + 2 * 3.77 * h_{n2}(298))$	Panas reaksi
x_ch4	$c_{ch4} / (c_{ch4} + c_{o2} + c_{co2} + c_{h2o} + c_{n2})$	Fraksi mol ch4
x_o2	$c_{o2} / (c_{ch4} + c_{o2} + c_{co2} + c_{h2o} + c_{n2})$	Fraksi mol o2
x_co2	$c_{co2} / (c_{ch4} + c_{o2} + c_{co2} + c_{h2o} + c_{n2})$	Fraksi mol co2
x_h2o	$c_{h2o} / (c_{ch4} + c_{o2} + c_{co2} + c_{h2o} + c_{n2})$	Fraksi mol h2o
x_n2	$c_{n2} / (c_{ch4} + c_{o2} + c_{co2} + c_{h2o} + c_{n2})$	Fraksi mol n2
Mr_mix	$(Mr_{ch4} * x_{ch4}) + (Mr_{o2} * x_{o2}) + (Mr_{co2} * x_{co2}) + (Mr_{h2o} * x_{h2o}) + (Mr_{n2} * x_{n2})$	Mr campuran
Cp_ch4	$(0.33298e5 + (0.79933e5 * ((2.0869e3 / (T[1[K]])) / \sinh(2.0869e3 / (T[1[K]]))^2)) + (0.41602e5 * ((991.96 / (T[1[K]])) / \cosh(991.96 / (T[1[K]]))^2))) * 1 [J/kmol/K]$	Kapasitas panas ch4
Cp_co2	$(0.2937e5 + (0.3454e5 * ((1.428e3 / (T[1[K]])) / \sinh(1.428e3 / (T[1[K]]))^2)) + (0.264e5 * ((588 / (T[1[K]])) / \cosh(588 / (T[1[K]]))^2))) * 1 [J/kmol/K]$	Kapasitas panas co2
Cp_o2	$(0.29103e5 + (0.1004e5 * ((2.5265e3 / (T[1[K]])) / \sinh(2.5265e3 / (T[1[K]]))^2)) + (0.09356e5 * ((1153.8 / (T[1[K]])) / \cosh(1153.8 / (T[1[K]]))^2))) * 1 [J/kmol/K]$	Kapasitas panas o2
Cp_h2o	$(0.33363e5 + (0.2679e5 * ((2.6105e3 / (T[1[K]])) / \sinh(2.6105e3 / (T[1[K]]))^2)) + (0.08896e5 * ((1169 / (T[1[K]])) / \cosh(1169 / (T[1[K]]))^2))) * 1 [J/kmol/K]$	Kapasitas panas h2o
Cp_n2	$(0.29105e5 + (0.086149e5 * ((1.7016e3 / (T[1[K]])) / \sinh(1.7016e3 / (T[1[K]]))^2)) + (0.0010347e5 * ((909.79 / (T[1[K]])) / \cosh(909.79 / (T[1[K]]))^2))) * 1 [J/kmol/K]$	Kapasitas panas n2
Cp_mix	$((Cp_{ch4} * x_{ch4}) + (Cp_{o2} * x_{o2}) + (Cp_{co2} * x_{co2}) + (Cp_{h2o} * x_{h2o}) + (Cp_{n2} * x_{n2})) / Mr_{mix}$	Kapasitas panas campuran
k_mix	$(Cp_{mix} + (5 * R_{const})) / (4 * Mr_{mix}) * \mu_{mix}$	Konduktivitas campuran
gamma	$Cp_{mix} / ((Cp_{mix} * Mr_{mix}) - R_{const})$	Gamma campuran

Adapun persamaan entalpi fungsi temperatur pada persamaan “H\_T” (Panas Reaksi) menggunakan menu *piecewise function* yang dapat dilihat pada Tabel 4.4, 4.5, dan 4.6. Untuk tiap komponen digunakan dua persamaan yaitu pada rentang 200 K sampai 1000 K, dan 1000 K sampai 3500 K yang nilai konstantanya sesuai dengan data dari *NASA Polynomials*.

**Tabel 4. 4** Persamaan entalpi CO<sub>2</sub>

Function name		h_co2
Start	End	
200	1000	$R\_const * T * (2.35677352E+00 + (8.98459677E-03 * T/2) + (-7.12356269E-06 * (T^2)/3) + (2.45919022E-09 * (T^3)/4) + (-1.43699548E-13 * (T^4)/5) + (-4.83719697E+04/T))$
1000	3500	$R\_const * T * (3.85746029E+00 + (4.41437026E-03 * T/2) + (-2.21481404E-06 * (T^2)/3) + (5.23490188E-10 * (T^3)/4) + (-4.72084164E-14 * (T^4)/5) + (-4.87591660E+04/T))$

**Tabel 4. 5** Persamaan entalpi H<sub>2</sub>O

Function name		h_h2o
Start	End	
200	1000	$R\_const * T * (4.19864056E+00 + (-2.03643410E-03 * T/2) + (6.52040211E-06 * (T^2)/3) + (-5.48797062E-09 * (T^3)/4) + (1.77197817E-12 * (T^4)/5) + (-3.02937267E+04/T))$
1000	3500	$R\_const * T * (3.03399249E+00 + (2.17691804E-03 * T/2) + (-1.64072518E-07 * (T^2)/3) + (-9.70419870E-11 * (T^3)/4) + (1.68200992E-14 * (T^4)/5) + (-3.00042971E+04/T))$

**Tabel 4. 6** Persamaan entalpi N<sub>2</sub>

Function name		h_n2
Start	End	
200	1000	$R\_const * T * (0.03298677E+02 + (0.14082404E-02 * T/2) + (-0.03963222E-04 * (T^2)/3) + (0.05641515E-07 * (T^3)/4) + (-0.02444854E-10 * (T^4)/5) + (-0.10208999E+04/T))$
1000	3500	$R\_const * T * (0.02926640E+02 + (0.14879768E-02 * T/2) + (-0.05684760E-05 * (T^2)/3) + (0.10097038E-09 * (T^3)/4) + (-0.06753351E-13 * (T^4)/5) + (-0.09227977E+04/T))$

- Penentuan Sistem *Subdomain* dan *Boundary*

Penyelesaian komputasi tiap fenomena fisis harus dilakukan satu per satu untuk mencapai konvergensi hasil (*sequential steps*). Urutan penyelesaian fenomena fisis adalah *Turbulent Flow* k-ε, dilanjutkan dengan *Transport of Diluted Species*, dan terakhir adalah *Heat Transfer*. Dengan cara ini maka pertama-tama dilakukan perhitungan kecepatan, yang hasilnya dipakai sebagai masukan untuk menghitung konsentrasi, dan terakhir perhitungan temperatur. Oleh karena *Turbulent Flow* k-ε merupakan fenomena fisis yang pertama kali diselesaikan, maka dibutuhkan nilai densitas dan viskositas yang tidak bergantung pada konsentrasi dan temperatur, sehingga nilainya dibuat konstan

yaitu densitas dan viskositas campuran produk pembakaran pada kondisi stoikiometri di suhu 1900 °C dan tekanan 1,014 bar yang perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Adapun kondisi batas yang digunakan pada masing-masing fenomena fisis:

### 1. *Turbulent Flow, k-ε*

Pada bagian *inconsistent stabilization, isotropic diffusion* diaktifkan dengan tuning parameter 0.05. Kemudian pada bagian *advanced settings*, diaktifkan *pseudo-time stepping*. Kedua hal ini dilakukan untuk meningkatkan stabilitas dan konvergensi. Pilihan *pseudo-time stepping* berguna untuk mengaktifkan algoritma pseudo-transien pada solver berbasis tekanan. Algoritma ini secara efektif menambahkan hubungan *unsteady* pada persamaan yang akan diselesaikan untuk meningkatkan stabilitas dan perilaku konvergensi. Penggunaan pilihan ini diperlukan untuk penyelesaian masalah dinamika fluida.

#### a) *Fluid Properties 1*

Persamaan:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -\rho\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (4.18)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.19)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4.20)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \epsilon_p \quad (4.21)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad P_k = \mu_T \left[ \nabla\mathbf{u} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] \quad (4.22)$$

- Densitas dan viskositas dari *variable*

b) *Wall 1*

Persamaan:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4.23)$$

$$\left[ (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] \mathbf{n} = -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} \mathbf{u}_{\text{tang}} \quad (4.24)$$

$$\mathbf{u}_{\text{tang}} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (4.25)$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \epsilon = -\rho \frac{C_\mu k^2}{\kappa_v \delta_w^+ \mu} \quad (4.26)$$

- Kondisi batasnya adalah *wall functions* yang nantinya untuk beberapa batasan akan di *override* oleh kondisi batas yang lain

c) *Initial Values 1*

- Menggunakan tekanan 1.014 bar (Oprins, 2002).

d) *Inlet 1*

Persamaan:

$$\mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n} \quad (4.27)$$

$$k = \frac{3}{2} (U_0 l_T)^2, \quad \epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l_T} \quad (4.28)$$

- Memilih boundary tempat masukan kecepatan udara dengan nilai 28 m/s (Ho Lee, 2010).

e) *Inlet 2*

Persamaannya sama dengan persamaan (4.27) dan (4.28).

- Memilih boundary tempat masukan kecepatan *fuel* dengan nilai 21,3 m/s (Ho Lee, 2010).

f) *Symmetry 1*

Persamaan:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{K} = \left[ (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I} \right] \mathbf{n} \quad (4.30)$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4.31)$$

- Memilih *boundary* yang menjadi kondisi batas simetri

g) *Outlet 1*

Persamaan:

$$p = p_0, \quad \left[ (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I} \right] \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (4.32)$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4.33)$$

- Memilih *boundary* tempat keluarnya kecepatan dengan kondisi tekanan 1.01385 bar dan tanpa *viscous stress*. Tekanan outlet harus lebih kecil dari *Initial Values 1* agar tidak terjadi *backflow*.

## 2. *Transport of Diluted Species*

Pada bagian *inconsistent stabilization, isotropic diffusion* diaktifkan dengan tuning parameter 0.05 untuk meningkatkan stabilitas dan perilaku konvergensi.

Terdapat konveksi sehingga mekanisme konveksi tersebut dicentang pada fisis ini. Ada lima komponen yang terdapat pada model yaitu CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub>.

a) *Convection and Diffusion 1*

Persamaan:

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_j) + \mathbf{u} \cdot \nabla c_j = R_j \quad (4.34)$$

$$\mathbf{N}_j = -D_j \nabla c_j + \mathbf{u} c_j \quad (4.35)$$

- *Velocity field* mengikuti *velocity* dari *Turbulent Flow, k-ε*

- Koefisien difusi mengikuti nilai standar yang sangat kecil yaitu  $1e-9 \text{ m}^2/\text{s}$ .

b) *No Flux 1*

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (4.36)$$

- Kondisi batas *no flux* diterapkan untuk seluruh komponen.

c) *Initial Values 1*

- Pada kondisi awal furnace terdapat udara dan sedikit  $\text{H}_2\text{O}$  serta  $\text{CO}_2$  dengan nilai sebagai berikut:

- $C_{\text{o}2} = 1.348 \text{ mol/m}^3$
- $C_{\text{h}2\text{o}} = 0.001 \text{ mol/m}^3$
- $C_{\text{co}2} = 0.001 \text{ mol/m}^3$
- $C_{\text{n}2} = 5.071 \text{ mol/m}^3$

Nilai awal  $\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{CO}_2$  diperlukan untuk perhitungan awal laju reaksi eddy disipasi. Sedangkan nilai konsentrasi  $\text{O}_2$  dan  $\text{N}_2$  dihitung pada tekanan 1,041 bar dan suhu  $1900 \text{ }^\circ\text{C}$  dengan persamaan gas ideal.

d) *Inflow 1*

Persamaan:

$$c_j = c_{0,j} \quad (4.37)$$

- Memilih boundary tempat masukan konsentrasi udara dengan nilai oksigen  $5.68 \text{ mol/m}^3$  dan nitrogen  $21.36 \text{ mol/m}^3$ . Nilai tersebut merupakan konsentrasi oksigen dan nitrogen pada reaksi pembakaran stoikiometri pada tekanan 1 bar dan suhu 298 K.

e) *Inflow 2*

Persamaannya sama dengan persamaan (4.37).



- Memilih *boundary* tempat masukan konsentrasi metana dengan nilai  $13.32 \text{ mol/m}^3$ . Nilai tersebut merupakan konsentrasi metana pada reaksi pembakaran stoikiometri pada tekanan 1 bar dan suhu 298 K.

f) *Symmetry 1*

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0 \quad (4.38)$$

- Memilih *boundary* yang menjadi kondisi batas simetri

g) *Reactions 1*

Persamaan:

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i \quad (4.39)$$

- Memilih *domain furnace* sebagai tempat berlangsungnya reaksi
- Nilai laju reaksi tiap komponen diambil dari persamaan laju yang telah didefinisikan pada *scalar expression* yaitu sebagai berikut:
  - $R_{\text{ch4}} = -R_{\text{EDM}}$  [mol/m<sup>3</sup>.s]
  - $R_{\text{o2}} = -2 * R_{\text{EDM}}$  [mol/m<sup>3</sup>.s]
  - $R_{\text{h2o}} = 2 * R_{\text{EDM}}$  [mol/m<sup>3</sup>.s]
  - $R_{\text{co2}} = R_{\text{EDM}}$  [mol/m<sup>3</sup>.s]

h) *Outflow 1*

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot D_i \nabla c_i = 0 \quad (4.40)$$

- Memilih *boundary* tempat keluaran konsentrasi komponen yaitu pada bagian atas *furnace*.

### 3. Heat Transfer

Pada bagian *inconsistent stabilization*, *isotropic diffusion* diaktifkan dengan tuning parameter 0.05 untuk meningkatkan stabilitas dan perilaku konvergensi.

Model menggunakan *heat transfer in fluids*.

#### a) Heat Transfer in Fluids 1

Persamaan:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p \quad (4.41)$$

- Tekanan dan kecepatan dari Turbulent Flow, k-ε
- Konduktivitas dari *variable*
- Fluida bertipe gas/liquid dengan densitas, rasio panas spesifik, dan kapasitas panas mengikuti parameter yang telah ditentukan pada *variable*

#### b) Thermal Insulation

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.42)$$

- Insulasi termal untuk dinding serta dasar furnace.

#### c) Initial Values 1

- Furnace diasumsikan memiliki suhu awal 2173°K (1900°C) yang merupakan suhu saat terjadinya pembakaran *steady*.

#### d) Temperature 1

Persamaan:

$$T = T_0 \quad (4.43)$$

- Memilih boundary tempat masukan udara dengan suhu 298°K (Ho Lee, 2010).

e) *Temperature 2*

Persamaannya sama dengan persamaan (4.43).

- Memilih *boundary* tempat masukan metana dengan suhu 298°K (Ho Lee, 2010).

f) *Symmetry 1*

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.44)$$

- Memilih *boundary* yang menjadi kondisi batas simetri

g) *Heat Source 1*

Persamaan:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} + Q_{vh} + W_p \quad (4.45)$$

- Memilih *domain furnace* sebagai tempat terbentuknya panas reaksi, dimana persamaannya adalah:

$$Q = H_T \cdot R_{EDM}$$

Nilai panas reaksi dikalikan dengan nilai negatif laju reaksi untuk menghasilkan nilai panas positif yang menandakan panas tergenerasi.

h) *Outflow 1*

Persamaan:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.46)$$

- Memilih *boundary* tempat keluaran suhu komponen yaitu pada bagian atas *furnace*.

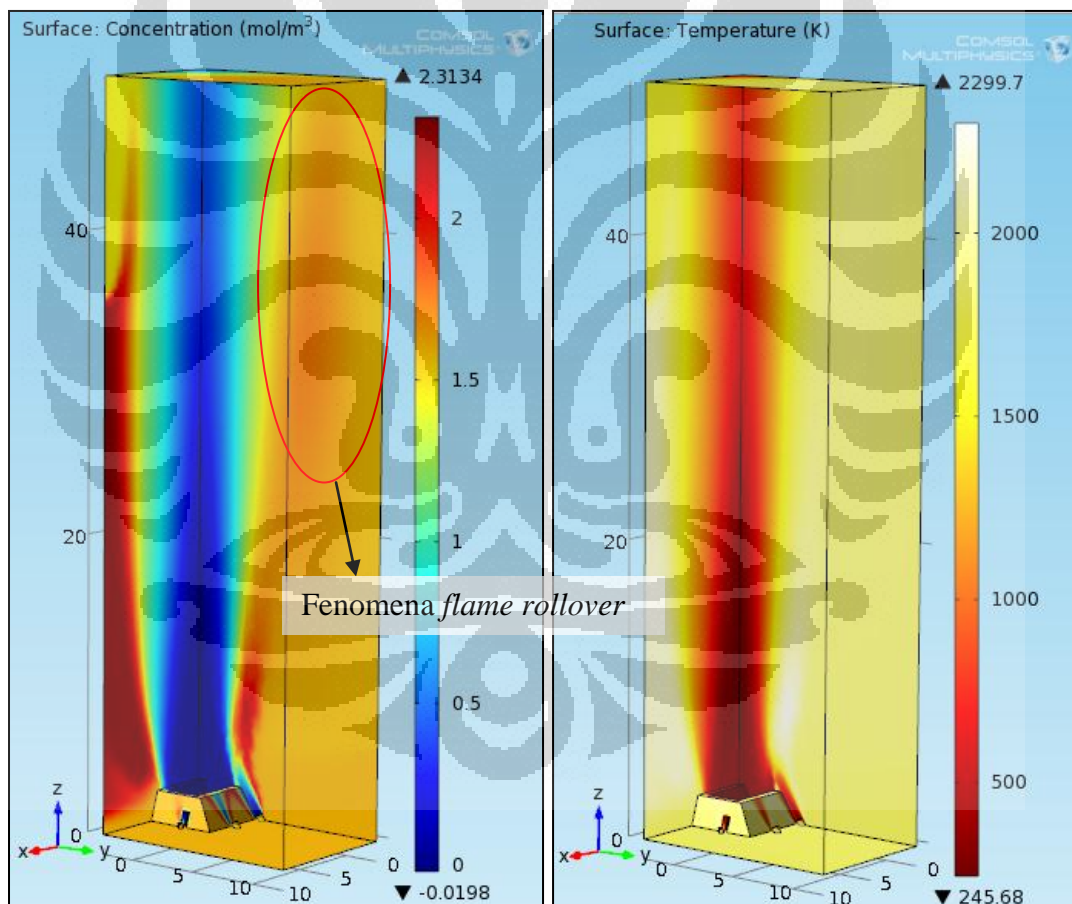
## BAB V

### HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

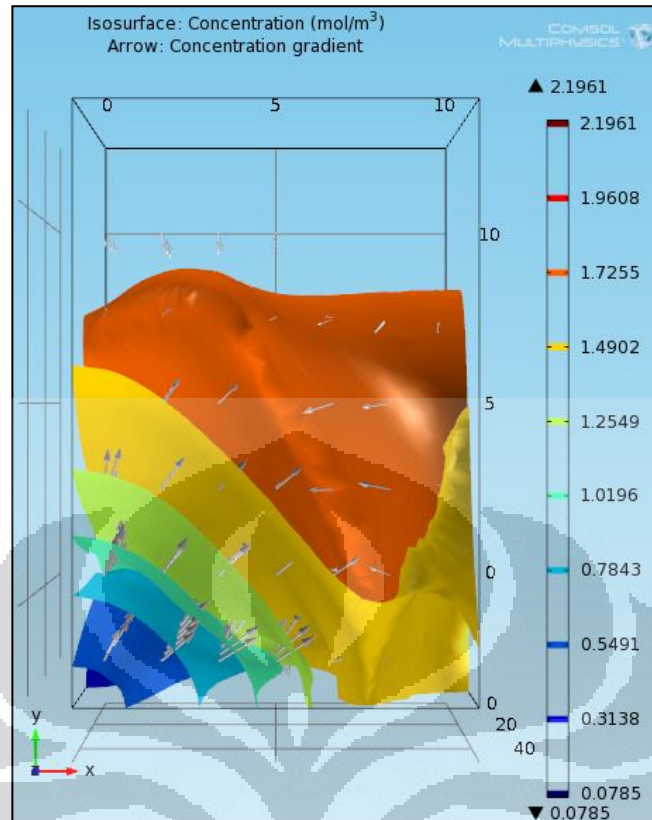
Bab ini berisikan hasil simulasi *flat flame burner* dengan model variasi geometri, kecepatan, suhu, serta rasio ekivalensi yang disertai dengan pembahasan pada tiap variasi tersebut.

#### 5.1. Model Variasi Geometri dan Kecepatan

Model yang pertama kali disimulasikan adalah geometri 1 dengan kecepatan *inlet* udara 28 m/s dan *inlet fuel* 21,3 m/s. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



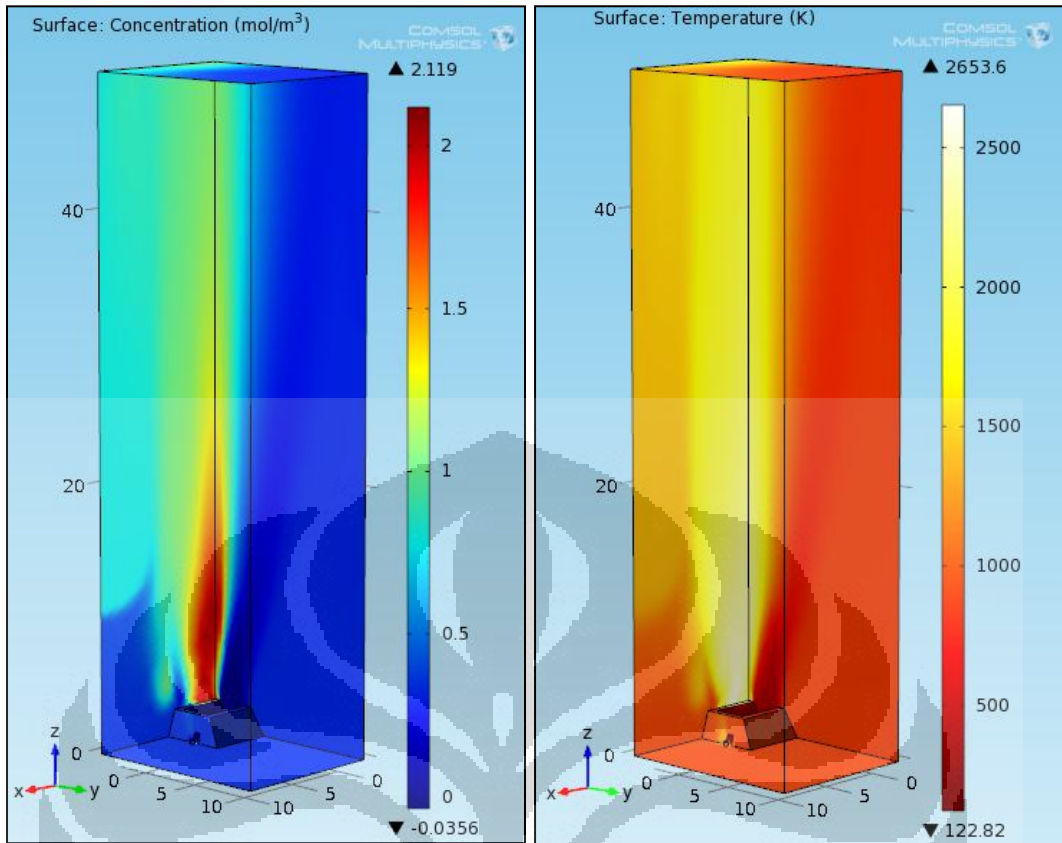
**Gambar 5. 1** Profil konsentrasi CO<sub>2</sub> (kiri) dan temperatur (kanan) pada geometri 1



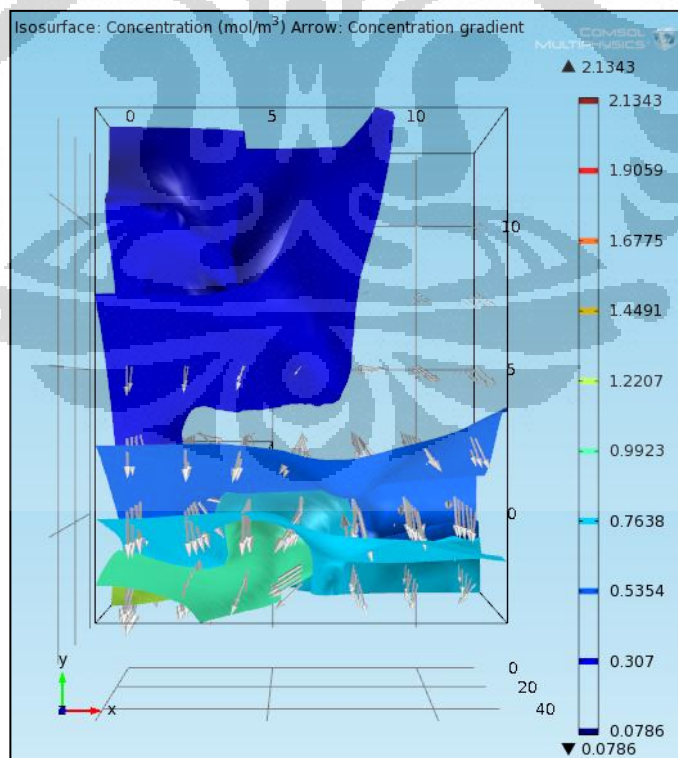
**Gambar 5. 2** Isosurface konsentrasi CO<sub>2</sub> dan arah gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> pada sisi atas furnace geometri 1

Gambar 5.1 menunjukkan profil konsentrasi CO<sub>2</sub> dan temperatur. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa CO<sub>2</sub> yang dihasilkan tidak menempel pada *fired wall*, melainkan mengalir ke arah lokasi tube pirolisis. Hal ini diperjelas dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> pada Gambar 5.2, dimana terlihat gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> melalui *arrow volume* mengarah ke sisi berlawanan dengan *fired wall*. Hal ini dapat menyebabkan *flame rollover* dimana nyala dapat mengenai tube pirolisis sehingga terjadi *local overheating* dan mempercepat terjadinya *coking*. Gradien temperatur dan konsentrasi CO<sub>2</sub> dari *wing fuel* juga terlihat menyebar luas dan tidak teratur ke sisi kiri furnace, dimana hal ini tidak diinginkan sebab nyala hanya diharapkan berada pada batasan sistem.

Oleh sebab itu geometri selanjutnya diubah untuk mengarahkan gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> ke arah *fired wall* dengan model geometri 2 yang hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 5.3.



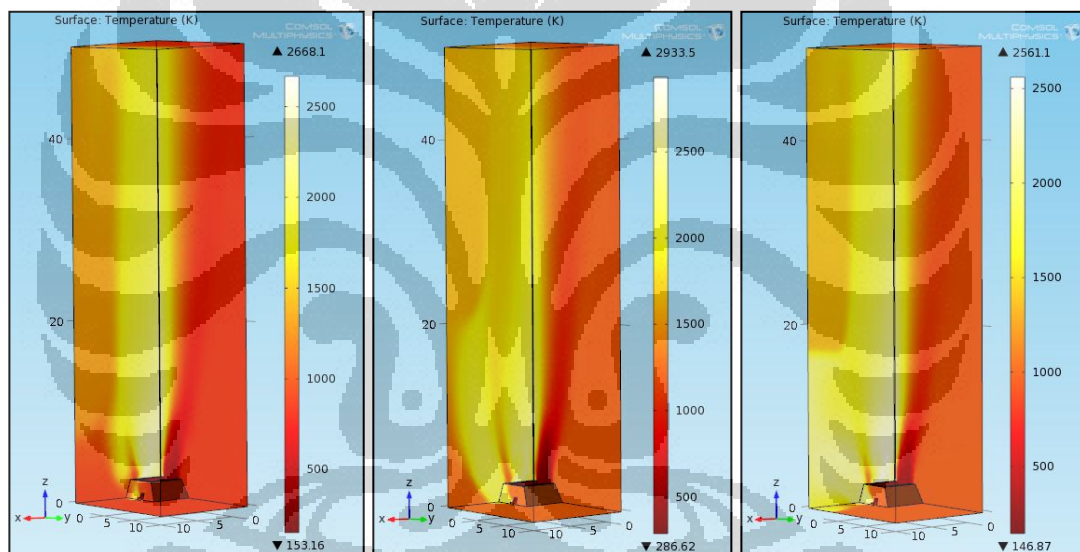
**Gambar 5. 3** Profil konsentrasi CO<sub>2</sub> (kiri) dan temperatur (kanan) pada geometri 2



**Gambar 5. 4** Isosurface konsentrasi CO<sub>2</sub> dan arah gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> pada sisi atas furnace geometri 2

Pada geometri 2 ujung tip keluaran *fuel* diposisikan didalam aliran masukan udara, dengan maksud agar udara yang keluar dengan kecepatan tertentu dapat menahan *fuel* serta produk pembakarannya ke arah *fired wall*. Dapat dilihat pada Gambar 5.4 bahwa gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> mengarah ke *fired wall* karena *fuel* dibakar di antara dinding dan aliran udara. Akan tetapi pada model geometri 2 ini profil nyala dari *wing fuel* belum terlihat mengarah ke *fired wall*, melainkan masih mengarah ke atas yang berbentuk *round (tubular) flame*.

Oleh sebab itu selanjutnya dilakukan variasi sudut *wing fuel* pada sumbu yz dimana pada kondisi awal di Gambar 5.3 dan 5.4 *wing fuel* memiliki sudut 90°, yang pada model selanjutnya akan arahkan ke *fired wall* dengan variasi sudut terhadap garis vertikal sebesar 80°, 68°, dan 60°. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 5.5.

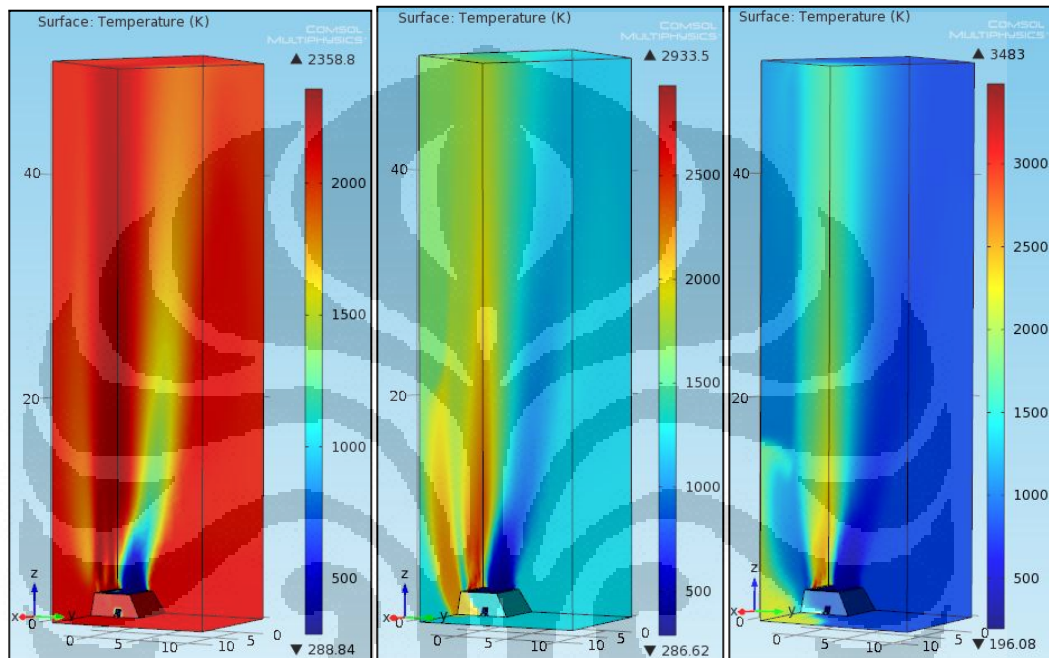


**Gambar 5. 5** Profil temperatur geometri 2a dengan sudut *wing fuel* 80° (kiri), 2b dengan sudut *wing fuel* 68° (tengah), dan 2c dengan sudut *wing fuel* 60° (kanan)

Dari Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa bentuk nyala yang paling baik adalah pada sudut *wing fuel* 68°, dimana nyala *wing fuel* mengarah ke *fired wall* dengan bentuk memanjang ke atas. Pada sudut *wing fuel* 80° bentuk nyala *wing fuel* tidak jauh berbeda dari Gambar 5.3 pada sudut 90° karena perbedaan sudut yang hanya sedikit. Sedangkan pada sudut *wing fuel* 60°, aliran *wing fuel* terlalu tajam menabrak dinding *fired wall* sehingga nyalanya bukan memanjang ke atas melainkan menyebar ke samping kiri yang disebabkan pula akibat adanya tumbukan kecepatan dari lubang samping aliran udara.



Selanjutnya setelah memperoleh hasil geometri 2 dengan sudut *wing fuel*  $22^\circ$  untuk menghasilkan *flat flame*, selanjutnya divariasikan kecepatan masukan udara karena udara mengontrol posisi produk pembakaran. Kecepatan udara dari model geometri sebelumnya adalah 28 m/s, yang selanjutnya divariasikan pada kecepatan udara 10,65 m/s (kecepatan *fuel* dibagi dua) dan 42,6 m/s (kecepatan *fuel* dikali dua). Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.6.

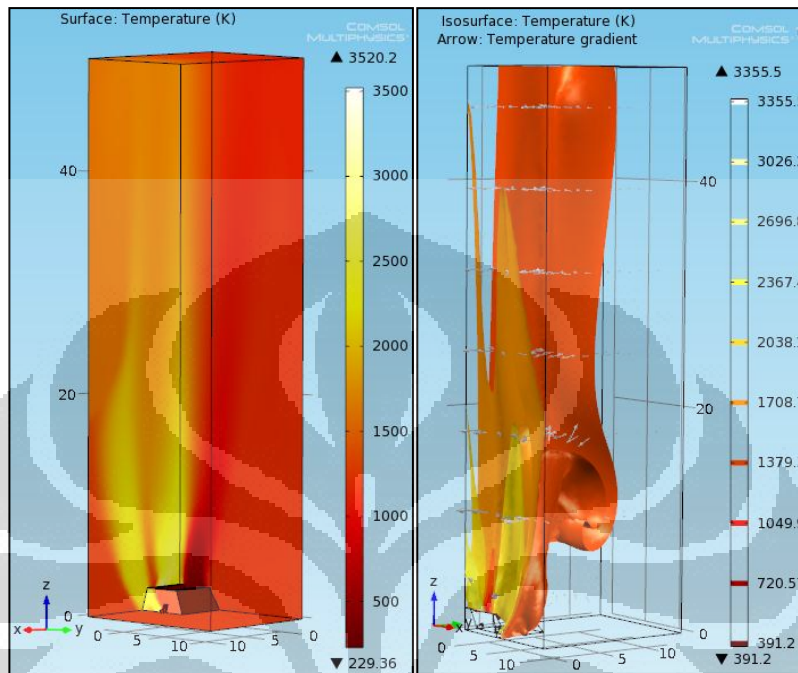


**Gambar 5. 6** Profil temperatur geometri 2b dengan kecepatan udara 10,65 m/s (kiri), 28 m/s (tengah), dan 42,6 m/s (kanan)

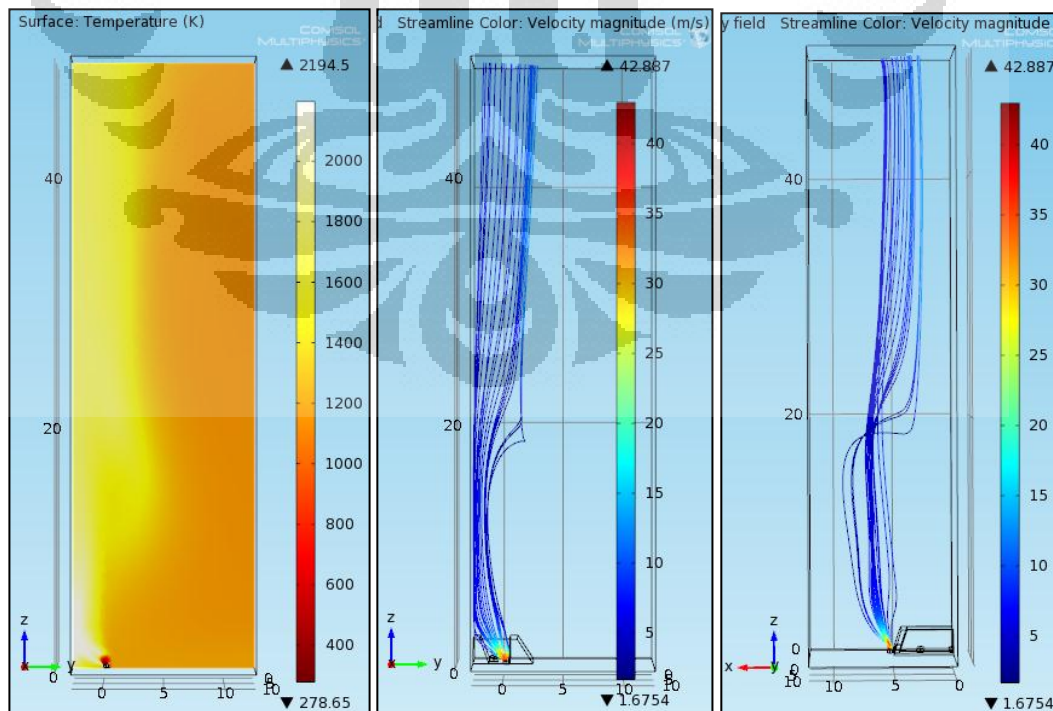
Dari gambar 5.6 pada kecepatan udara 10,65 m/s terdapat temperatur yang hampir sama pada tempat terbakarnya *fuel* dengan lokasi tube pirolisis. Hal ini mengindikasikan adanya konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang cukup tinggi diluar bagian antara *fired wall* dan udara, yang disebabkan kecepatan udara terlalu kecil sehingga tidak lagi mengontrol pembakaran berada pada *fired wall*. Kemudian dalam perbandingan profil suhu untuk kecepatan udara 28 m/s dan 42,6 m/s, dapat dilihat bahwa kecepatan 42,6 m/s menghasilkan profil nyala dari *main fuel* yang lebih baik dan rata dibandingkan kecepatan 28 m/s. Akan tetapi profil nyala dari *wing fuel* terlalu menyebar ke kiri disebabkan kecepatan dari lubang samping udara terlalu besar untuk kecepatan *fuel* wing 21,3 m/s. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa perbedaan kecepatan udara dan *wing fuel* tidak boleh terlalu jauh. Sehingga



selanjutnya disimulasikan model geometri 2b dengan perbandingan kecepatan udara, *main fuel*, dan *wing fuel* adalah 2 : 1 : 2. Kecepatan udara diset 42,6 m/s, kecepatan *main fuel* 21,3 m/s, dan kecepatan *wing fuel* 42,6 m/s yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.7.



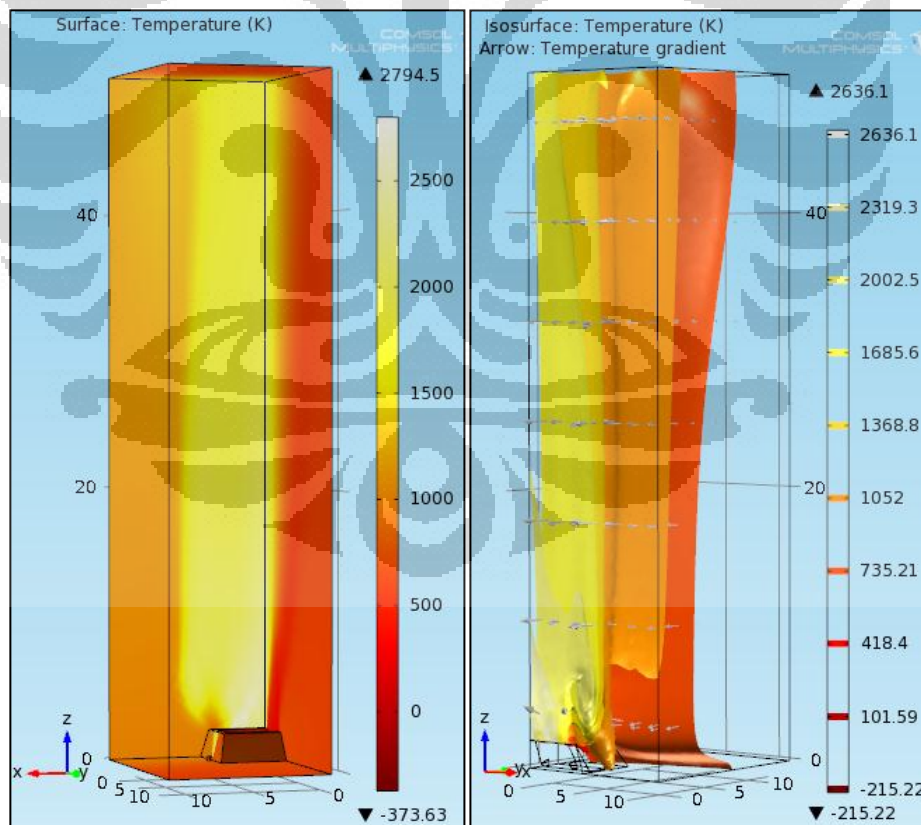
**Gambar 5. 7** Profil temperatur *surface* (kiri) dan *isosurface* (kanan) pada geometri 2b dengan kecepatan udara 42,6 m/s, kecepatan *main fuel* 21,3 m/s, dan kecepatan *wing fuel* 42,6 m/s



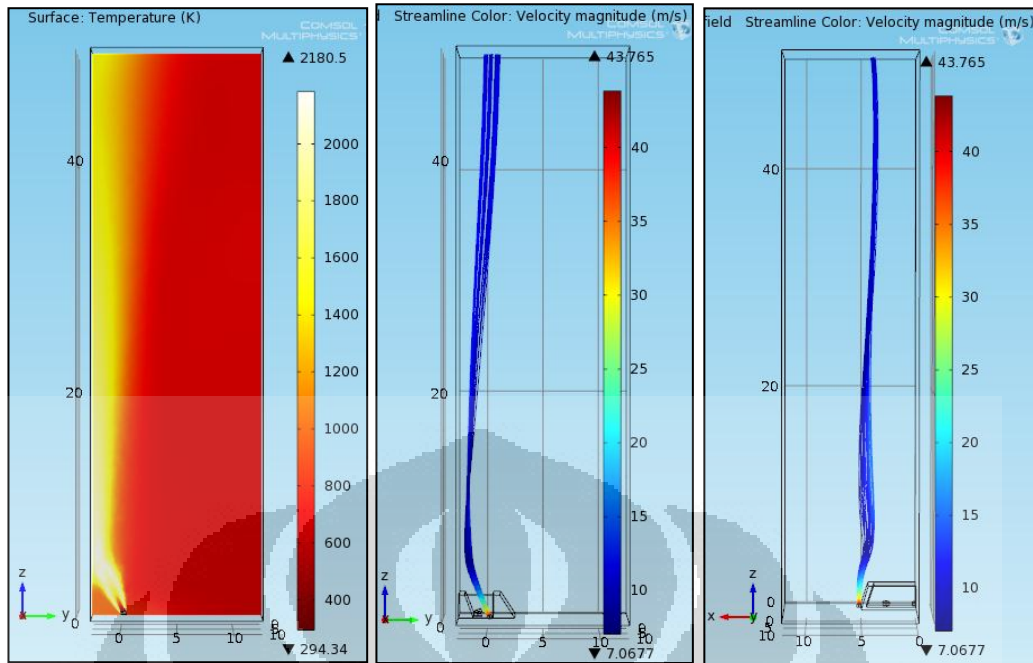
**Gambar 5. 8** Profil temperatur pada bidang yz di posisi x titik tengah *wing fuel* (kiri) serta aliran kecepatan dari *wing fuel* dilihat dari sumbu yz (tengah) dan sumbu xz (kanan).

Pada Gambar 5.7 terlihat nyala dari *main fuel* cukup seragam dari bawah sampai atas *furnace*, dan inilah bentuk *flat flame* yang diinginkan. Pada model ini *wing fuel* juga telah menghasilkan profil nyala yang menempel ke *fired wall*. Namun nyala dari *wing fuel* tidak serata nyala *main fuel* yang dapat dilihat jelas pada Gambar 5.7 *isosurface* pada temperatur 1708,7 K dan 1379,3 K dan Gambar 5.8. Hal ini disebabkan tidak adanya udara yang menahan pembakaran dari *wing fuel* untuk tetap rapat ke *fired wall*, sehingga semakin keatas kecepatan akan semakin menurun dan ada sedikit konsentrasi CO<sub>2</sub> menyebar ke tengah *furnace*.

Untuk memperoleh distribusi temperatur yang lebih seragam dari *main fuel* maupun *wing fuel* maka geometri perlu dimodifikasi kembali. Geometri yang digunakan pada model selanjutnya adalah geometri 3, dimana lubang samping keluaran udara ditutup sehingga *fuel wing* mendapat suplai udara yang sama dengan *main fuel*. Simulasi geometri 3 dilakukan pada setting kecepatan udara dan *wing fuel* 42,6 m/s, dan kecepatan *main fuel* 21,3 m/s. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 5.9.



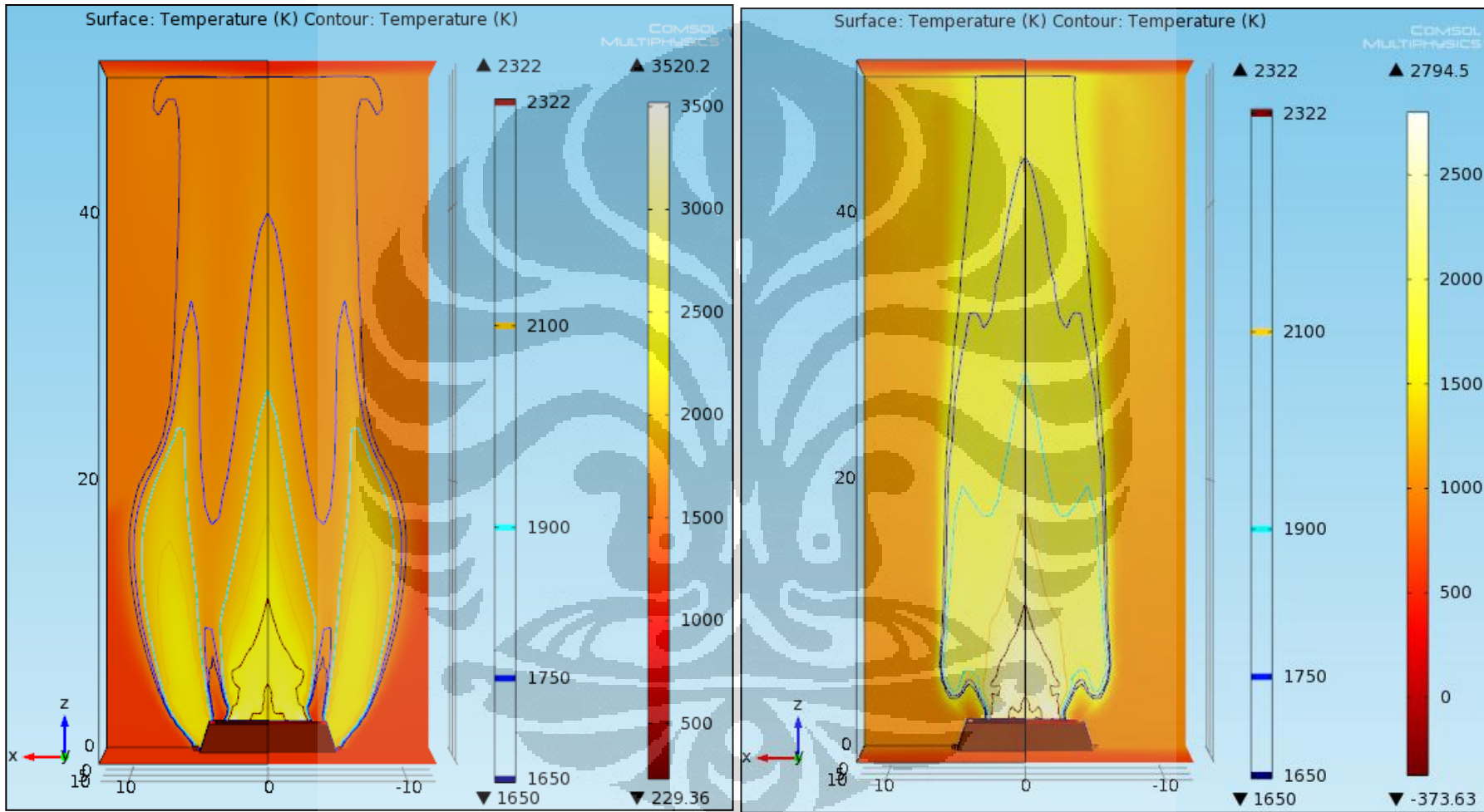
**Gambar 5.9** Profil temperatur *surface* (kiri) dan *isosurface* (kanan) pada geometri 3 dengan kecepatan udara dan *wing fuel* 42,6 m/s, kecepatan *main fuel* 21,3 m/s.



**Gambar 5. 10** Profil temperatur pada bidang yz di posisi x titik tengah *wing fuel* (kiri) serta aliran kecepatan dari *wing fuel* dilihat dari sumbu yz (tengah) dan sumbu xz (kanan).

Dari Gambar 5.9 dapat dilihat bahwa profil nyala keseluruhan lebih merata sepanjang sumbu z, yang didukung dengan profil nyala *wing fuel* pada Gambar 5.10. Hal ini disebabkan seluruh kecepatan dari *main fuel* maupun *wing fuel* langsung ditabrakkan ke *fired wall* dan mengarah ke atas tanpa adanya kecepatan berpengaruh yang dominan ke arah sumbu x maupun ke arah sumbu y.

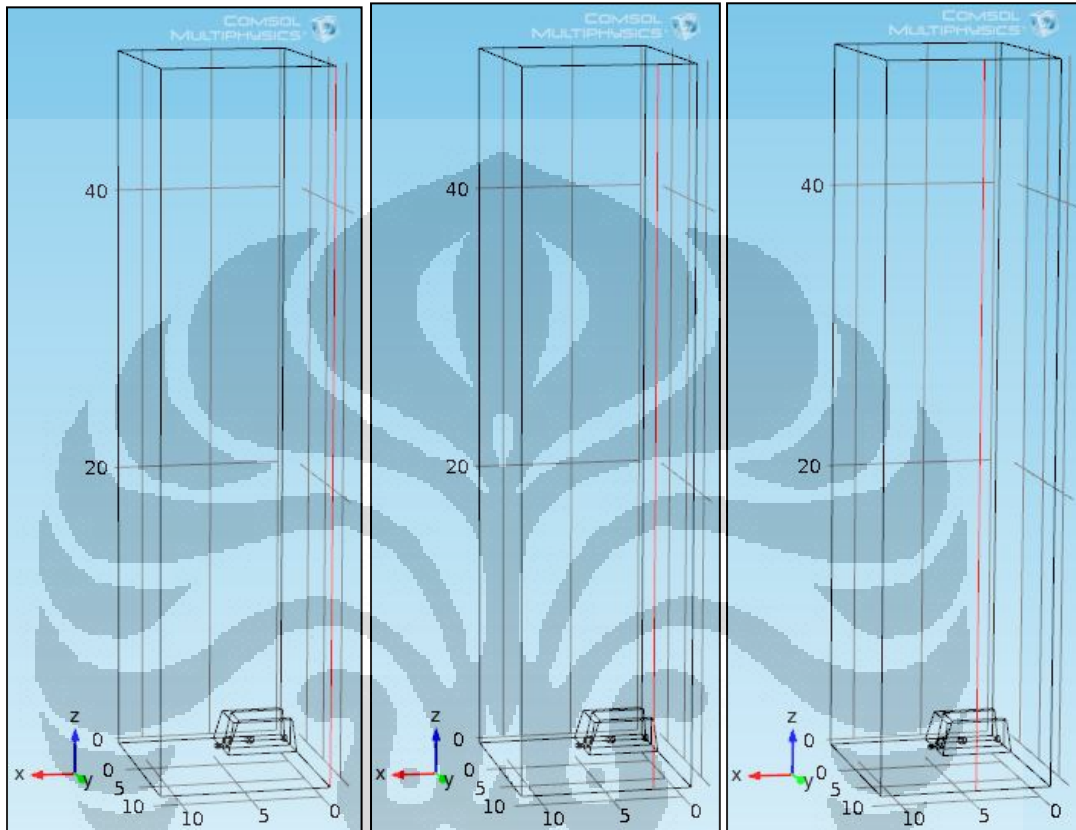
Kemudian pada bagian terakhir ini akan dibahas mengenai perbandingan geometri 2b dan geometri 3 pada kecepatan yang sama yaitu *inlet* udara dan *wing fuel* 42,6 m/s; *inlet main fuel* 21,3 m/s. Pada Gambar 5.11 dapat dilihat bentuk utuh *flat flame burner* yang dibuat dengan fasilitas *surface mirror 3D*. Untuk mempermudah perbandingan temperatur yang dihasilkan, dibuat kontur pada suhu yang sama yaitu 1650 K, 1750 K, 1900 K, 2100 K, dan 2322 K. Dapat dilihat bahwa pada suhu yang sama misalnya 1750 K, nyala untuk geometri 2 lebih lebar ke kiri dan ke kanan, sedangkan pada geometri 3 nyalanya lebih panjang ke atas. Hal ini menggambarkan bahwa geometri 2b memiliki profil penyebaran temperatur ke arah horizontal yang lebih baik, dan sebaliknya geometri 3 memiliki profil penyebaran ke arah vertikal yang lebih baik. Namun perlu diingat bahwa pada geometri 2b distribusi tebal nyala ke arah vertikal tidaklah seragam seperti yang ditunjukkan Gambar 5.8, sehingga kedua disain *flat flame burner* ini perlu dikaji ulang untuk aplikasinya pada *furnace pirolisis* yang sesuai.



**Gambar 5. 11** Profil temperatur *surfacerirror 3D* dan kontur pada geometri 2b (kiri) dan geometri 3 (kanan) pada kecepatan yang sama

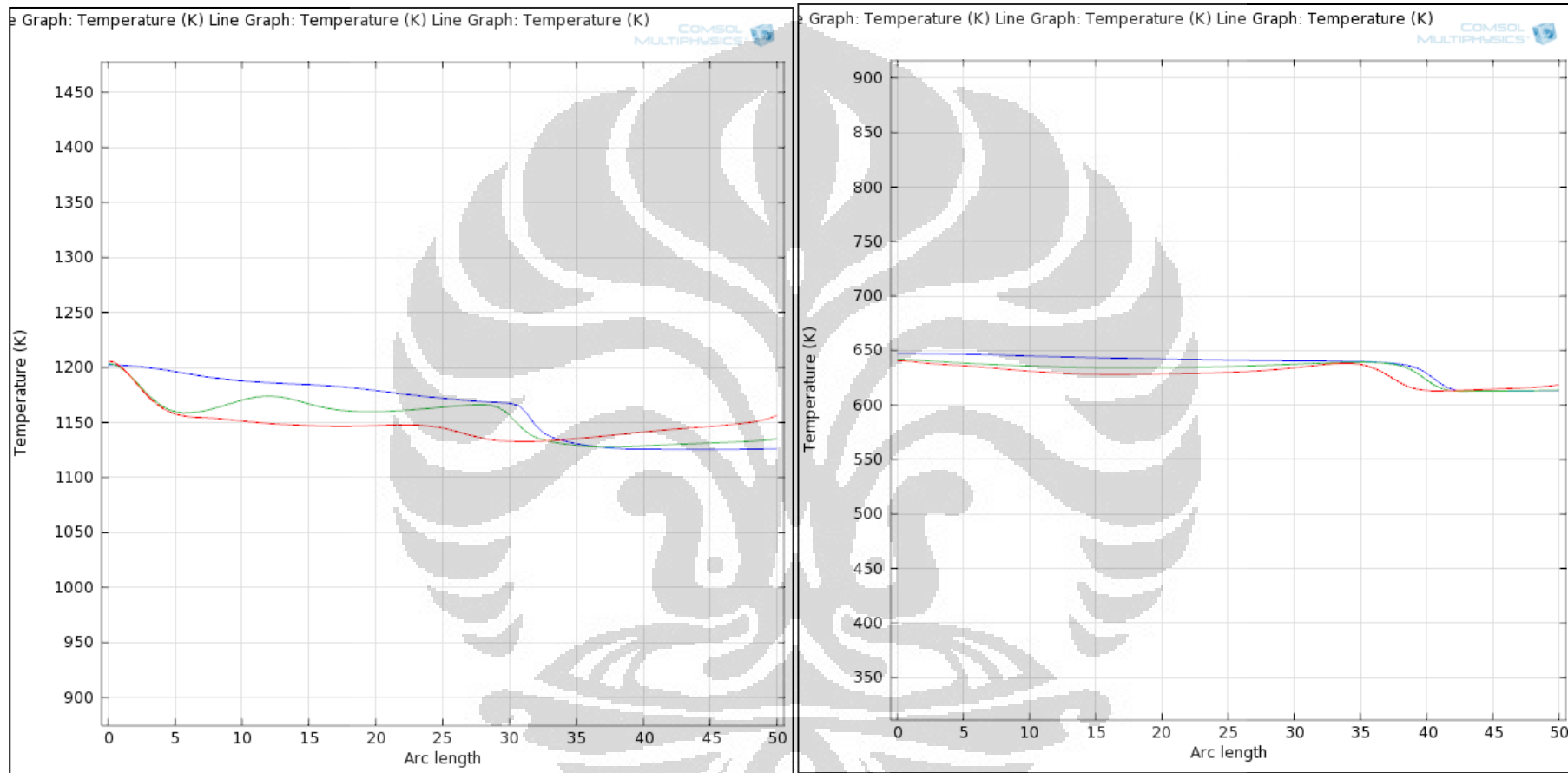


Selanjutnya dibandingkan profil temperatur di beberapa garis vertikal bidang  $xz$  yaitu pada lokasi tube pirolisis. Pengambilan garis analisis temperatur dilakukan pada lokasi garis merah yang dapat dilihat pada gambar 5.12. Garis merah tersebut berimpit dengan lokasi tube pirolisis dengan lokasi pada sumbu  $x$  berada di titik tengah *middle main fuel* ( $x = 0$ ), *left main fuel* ( $x = 2,7$ ), dan *wing fuel* ( $x = 5,3; 5,2$ ).



**Gambar 5. 12** Lokasi garis merah untuk analisis temperatur dimana  $x = 0$  (kiri);  $x = 2,7$  (tengah) dan  $x = 5,3; 5,2$  (kanan)

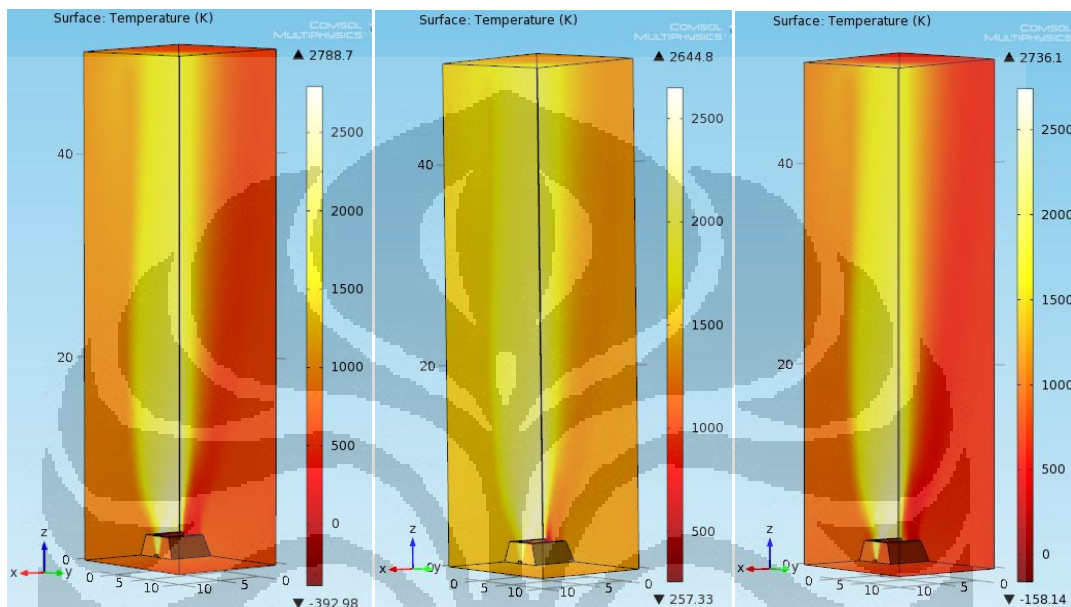
Grafik profil temperatur pada ketiga garis analisis untuk geometri 2b dan geometri 3 dapat dilihat pada Gambar 5.13, dimana terlihat bahwa profil temperatur sepanjang garis vertikal yang lebih merata dimiliki oleh model geometri 3. Profil nyala yang tidak stabil pada geometri 2b merupakan representasi dari bentuk nyala yang dihasilkan pada *fired wall*. Kelebihan geometri 2b adalah dihasilkannya suhu konveksi yang lebih tinggi. Namun pada kondisi nyata perlu juga dipertimbangkan perpindahan panas radiasi dari nyala yang dihasilkan untuk memperoleh profil temperatur pada lokasi tube pirolisis.



**Gambar 5. 13** Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah *inlet fuel* pada *middle main fuel* (biru), *left main fuel* (hijau), dan *wing fuel* (merah) untuk model geometri 2b (kiri) dan model geometri 3 (kanan)

## 5.2. Model Variasi Suhu

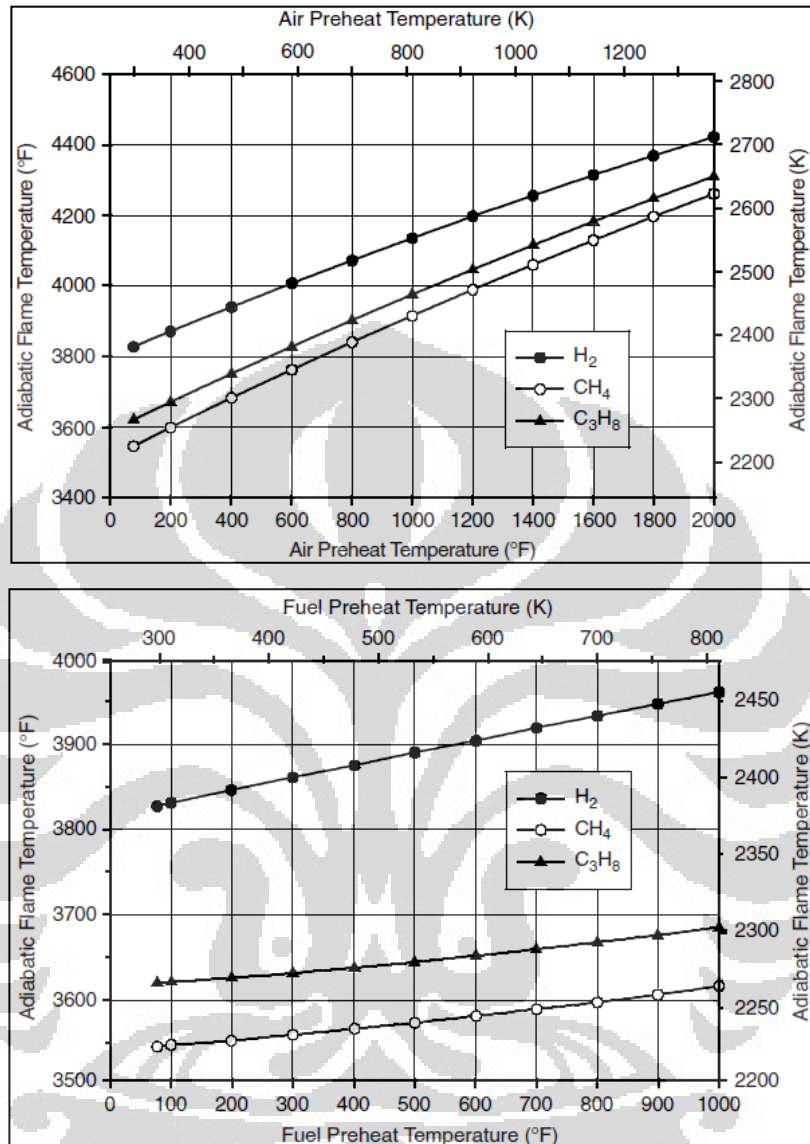
Pada bagian ini akan digunakan geometri 3 dengan kecepatan udara 42,6 m/s dan kecepatan *main fuel* serta *wing fuel* 21,3 m/s untuk melakukan variasi suhu masukan udara dan *fuel*. Suhu divariasikan pada kondisi  $T_{fuel}$  293 K dan Tudara 1200 K, serta  $T_{fuel}$  1200 K dan Tudara 293 K. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 5.14.



**Gambar 5. 14** Profil suhu pada Tudara dan  $T_{fuel}$  298 K (kiri); Tudara 1200 K,  $T_{fuel}$  298 K (tengah); dan Tudara 298 K,  $T_{fuel}$  1200 K (kanan)

Dari hasil simulasi pada Gambar 5.14 dapat dilihat bahwa model dengan kondisi Tudara dan  $T_{fuel}$  298 K menghasilkan suhu pada kondisi *steady state* yang paling tinggi yaitu 2788,7 K. Namun ternyata tidak terdapat perbedaan suhu yang terlalu jauh pada dua model lainnya, padahal kedua model lainnya itu diberi suhu masukan udara maupun *fuel* yang jauh lebih tinggi. Hal ini disebabkan batasan model yang hanya mengubah nilai suhu pada *boundary* masukan udara dan *fuel*, namun tidak terjadi perubahan konsentrasi, densitas, maupun viskositas. Oleh sebab itu hasil pada kondisi *steady state* untuk variasi suhu masukan ini tidak akan berpengaruh banyak pada suhu maksimum yang dapat dihasilkan. Pada kondisi nyata, peningkatan suhu masukan udara maupun *fuel* akan meningkatkan temperatur nyala adiabatik yang juga meningkatkan suhu pembakaran keseluruhan karena adanya perubahan parameter kecepatan yaitu densitas dan viskositas, serta komposisi. Kondisi nyata harusnya sesuai hasil eksperimen perusahaan John Zink

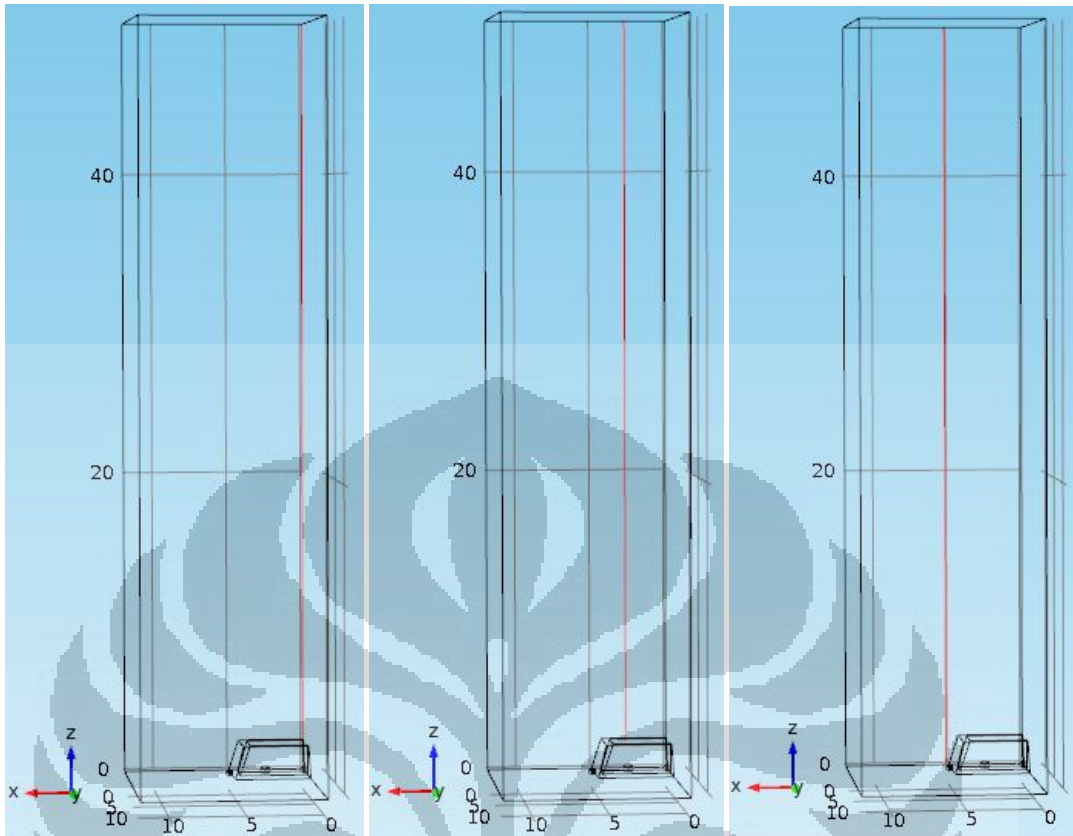
Co., dimana semakin tinggi suhu awal udara maupun bahan bakar maka akan semakin tinggi temperatur nyala adiabatik yang dihasilkan sesuai Gambar 5.15.



Gambar 5. 15 Temperatur nyala adiabatik terhadap pemanasan udara untuk campuran stoikiometri (atas) dan terhadap pemanasan bahan bakar (bawah). (Sumber dari John Zink Co., LLC.)

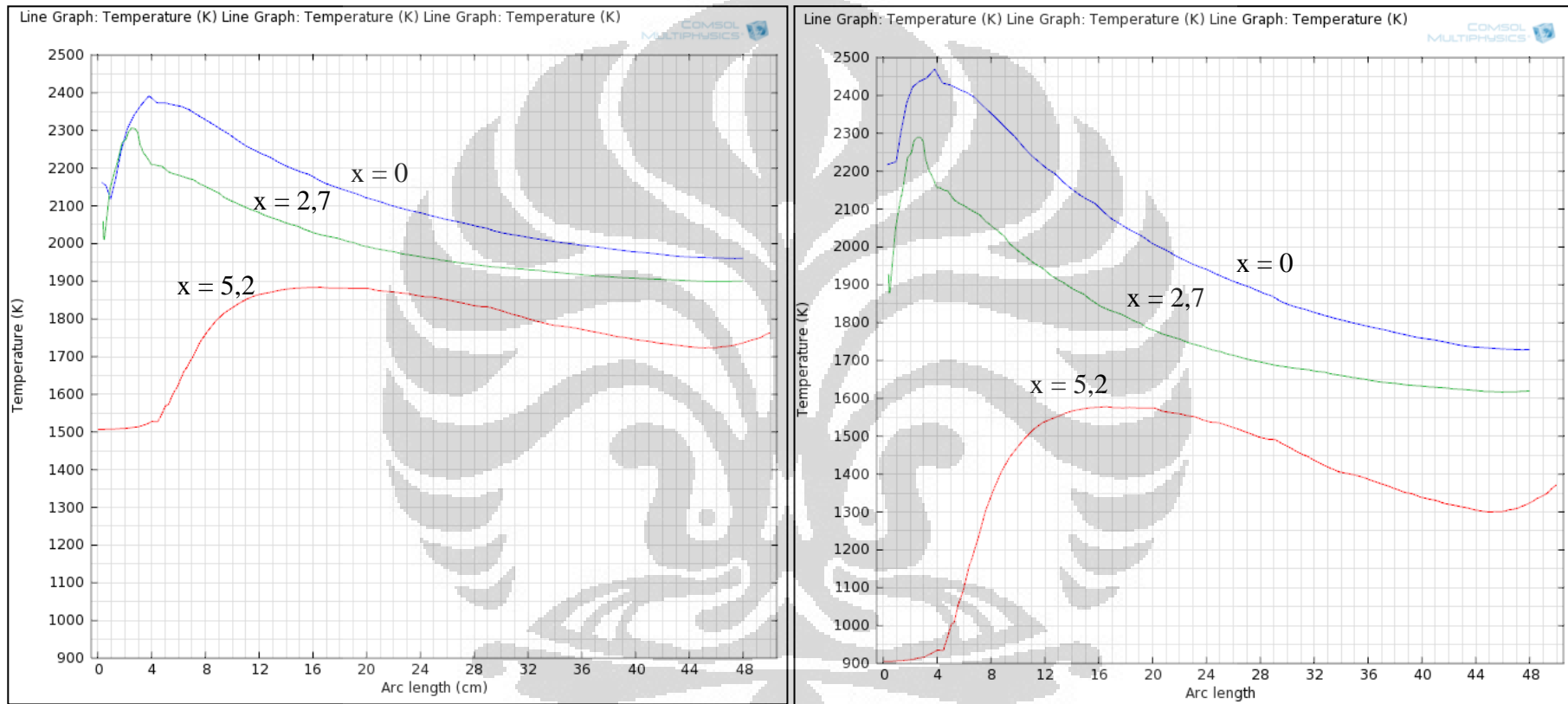
Kembali pada Gambar 5.14, temperatur rata-rata yang paling besar terdapat pada sudut *furnace* di lokasi *middle main fuel*. Berikut akan dibandingkan profil temperatur pada lokasi tersebut dan beberapa lokasi lain antara model Tudara 1200K dan model  $T_{fuel}$  1200 K. Pengambilan garis analisis temperatur dilakukan pada lokasi garis merah yang dapat dilihat pada gambar 5.16. Garis merah tersebut berimpit dengan *fired wall* dengan lokasi pada sumbu x berada di titik tengah *middle main fuel* ( $x = 0$ ), *left main fuel* ( $x = 2,7$ ), dan *wing fuel* ( $x = 5,2$ ).





**Gambar 5. 16** Lokasi garis merah untuk analisis temperatur dimana  $x = 0$  (kiri);  $x = 2,7$  (tengah) dan  $x = 5,2$  (kanan)

Dari gambar 5.17 dapat dilihat bahwa pada  $x=0$ , untuk model  $T_{fuel}$  1200 K pada jarak 0 cm sampai 10 cm diperoleh suhu yang lebih tinggi daripada model Tudara 1200 K. Hal ini dikarenakan pada model Tudara 1200 K nilai  $T_{fuel}$ nya lebih kecil yaitu 298 K, dan begitupun sebaliknya untuk model  $T_{fuel}$ . Mulai dari titik 15 cm sampai 48 cm, suhu pada model Tudara 1200 K lebih besar sebab konsentrasi udara semakin banyak. Peningkatan suhu diawal dari titik 0 cm sampai 4 cm dikarenakan daerah tersebut merupakan zona awal terbentuknya nyala sehingga suhu semakin meningkat sampai titik 4 cm. Dan mulai dari titik 4 cm sampai seterusnya merupakan daerah dimana konsentrasi  $CO_2$  mulai berkurang sehingga suhu yang dihasilkan makin menurun.



**Gambar 5. 17** Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah *inlet fuel* untuk model  $T_{udara} = 1200$  K (kiri) dan model  $T_{fuel} = 1200$  K (kanan)

Sedangkan pada garis  $x=2,7$  terlihat bahwa suhu keseluruhan untuk model *Tfuel* 1200 K lebih rendah daripada model Tudara 1200 K. Hal ini dikarenakan pada lokasi tersebut konsentrasi udara lebih besar daripada garis  $x=0$ , sehingga suhu awal udara yang sudah tinggi pada model Tudara 1200 K akan menghasilkan suhu pembakaran yang lebih tinggi pula.

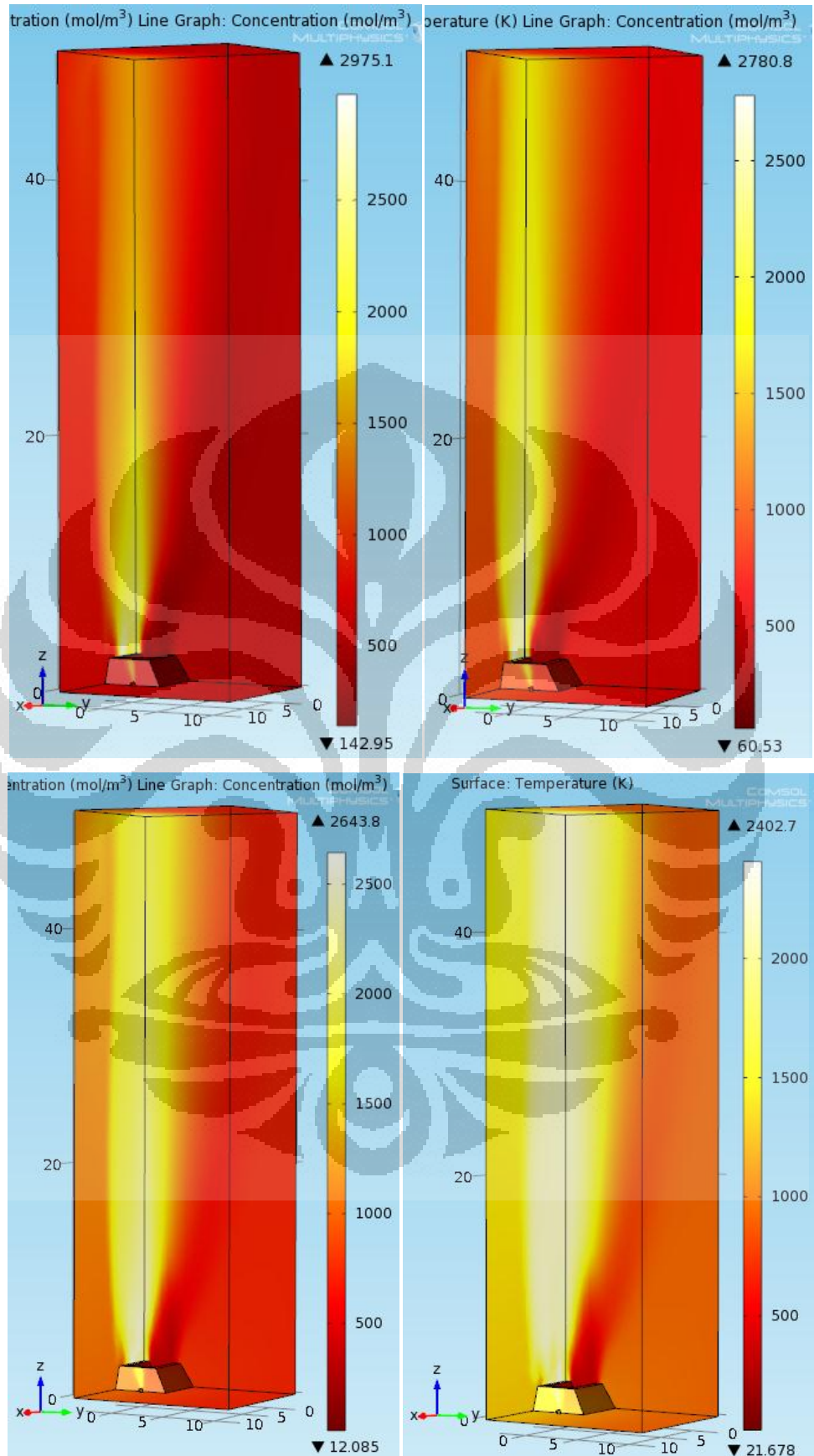
Dan pada garis  $x=5,2$  konsentrasi udara semakin besar sehingga model Tudara 1200 K akan memiliki rata-rata suhu yang lebih tinggi. Dari jarak 0 cm sampai 4 cm yang terjadi adalah proses perpindahan konveksi *fuel* menuju udara yang secara signifikan mulai ditemui pada jarak 4 cm. Kemudian nyala api secara signifikan terbentuk dari jarak 4 cm sampai 16 cm, sehingga suhu akan terus meningkat drastis seiring bertambahnya konsentrasi  $CO_2$ , dan setelah jarak 16 cm konsentrasi  $CO_2$  menurun sehingga suhunya ikut menurun sampai jarak 45 cm, dan setelahnya suhu meningkat dikarenakan adanya  $CO_2$  dari *main fuel* yang kekurangan kecepatan sehingga menyebar ke sebelah kiri dan suhunya masih tinggi.

### 5.3. Model Variasi Rasio Ekivalensi

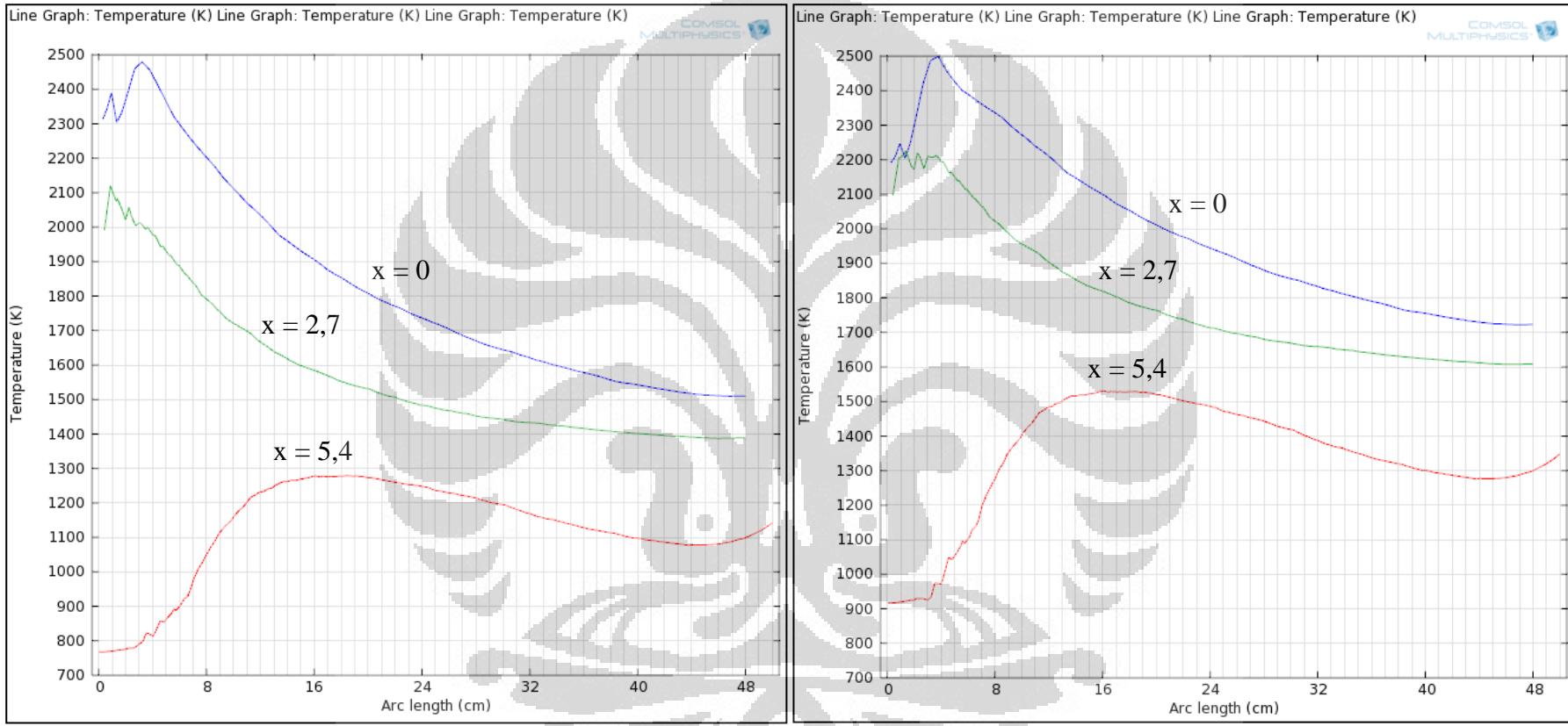
Selanjutnya dilakukan variasi rasio ekivalensi ( $\phi$ ) yaitu pada 0,6 ; 1 ; 1,4; dan 3. Geometri yang digunakan adalah geometri 3 dengan kecepatan udara 42,6 m/s dan kecepatan *wing fuel* serta *main fuel* 21,3 m/s. Jarak *wing fuel* ditambah 2 cm ke arah sumbu x untuk memudahkan konvergensi. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 5.18. Analisis dibantu dengan cara yang sama seperti pada Gambar 5.16.

Pada perbandingan hasil rasio ekivalensi 0,6 terhadap 1, ternyata dapat dilihat bahwa distribusi nyala ke arah vertikal semakin tidak merata dan terjadi penurunan suhu. Hal ini diakibatkan adanya udara berlebih yang secara keseluruhan juga mengurangi suhu di titik garis  $x=0$ ,  $x=2,7$ , dan  $x=5,4$  yang dapat dilihat pada Gambar 5.19.

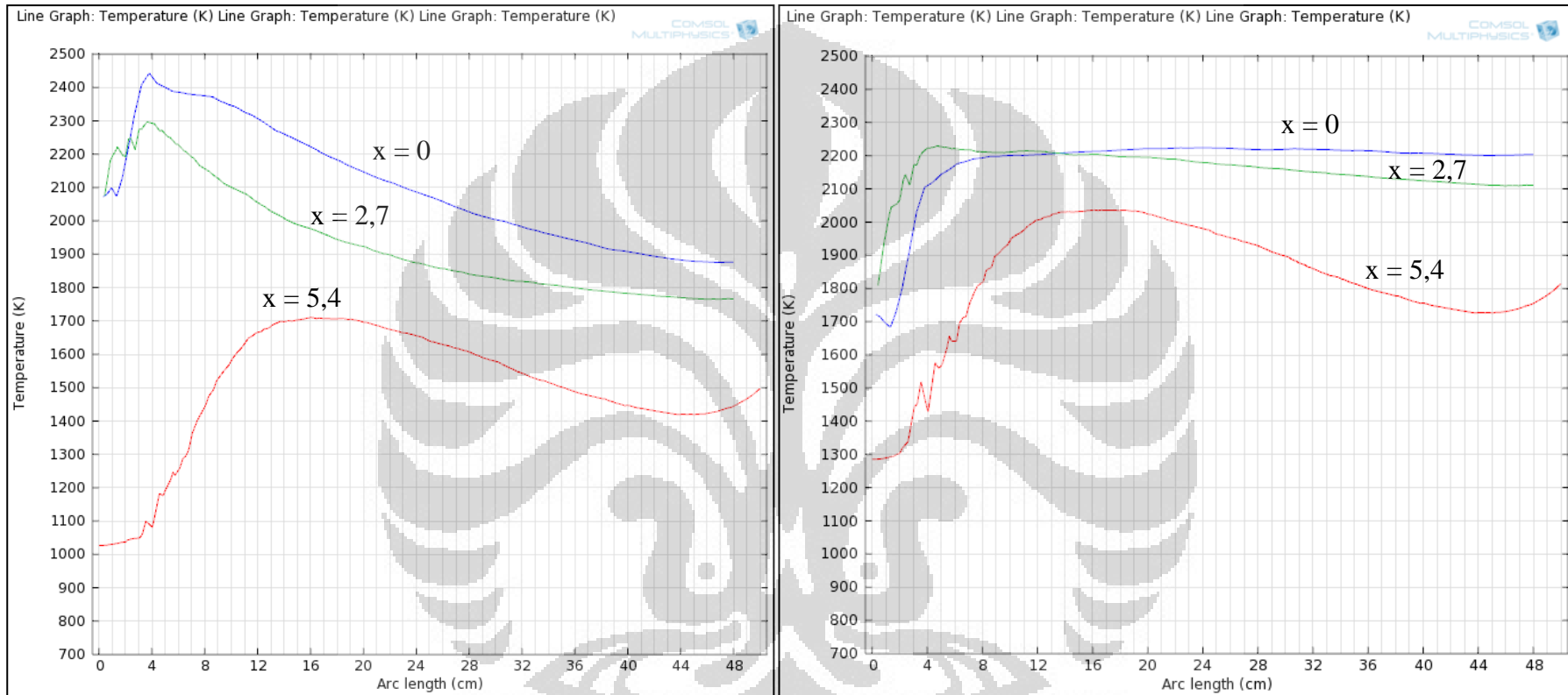
Kemudian bila dibandingkan model rasio ekivalensi 1 terhadap model rasio ekivalensi 1,4; pada Gambar 5.18 dapat dilihat bahwa pada rasio ekivalensi 1,4 distribusi nyala ke arah vertikal semakin merata dan terjadi peningkatan suhu rata-rata pada tiap garis analisis. Hal ini disebabkan laju reaksi pembakaran  $CH_4$  yang lebih besar sehingga konsentrasi  $CO_2$  ke arah vertikal juga lebih besar daripada model rasio ekivalensi 1.



**Gambar 5. 18** Profil temperatur geometri 3 pada rasio ekivalensi 0,6 (kiri atas); 1 (kanan atas); 1,4 (kiri bawah); dan 3 (kanan bawah)



Gambar 5. 19 Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah inlet fuel untuk rasio ekivalensi 0.6 (kiri) dan 1 (kanan)



**Gambar 5. 20** Profil temperatur sepanjang garis di tiap titik tengah *inlet fuel* untuk rasio ekivalensi 1,4 (kiri) dan 3 (kanan)

Selanjutnya pada perbandingan model rasio ekivalensi 1,4 terhadap model rasio ekivalensi 3 yang dapat dilihat pada gambar 5.20, ternyata distribusi suhu ke arah vertikal jauh lebih merata pada rasio ekivalensi 3. Hal ini menunjukkan keseragaman temperatur yang baik pada garis vertikal posisi  $x=0$  dan  $x=2,7$ . Namun dari Gambar 5.18 terlihat bahwa untuk model rasio ekivalensi 3, nyala tidak merata di *fired wall* yang disebabkan terlalu banyak *fuel* berlebih dibandingkan udara sehingga  $CO_2$  yang terbentuk makin mengarah ke tengah *furnace*. Secara umum nilai keseluruhan temperatur pada garis  $x=0$ ,  $x=2,7$ , dan  $x=5,4$  akan semakin mendekati seragam dengan naiknya rasio ekivalensi. Namun perlu diperhatikan semakin banyak *fuel* berlebih maka akan semakin banyak *soot* yang diproduksi sehingga memungkinkan semakin cepatnya terjadi *coking*.

Pada hasil keseluruhan model variasi rasio ekivalensi ini, dapat dilihat pada Gambar 5.19 dan 5.20 bahwa temperatur puncak tertinggi terjadi pada model rasio ekivalensi 1 yaitu pada jarak 4 cm senilai 2500 K. Sehingga dapat disimpulkan bahwa berkurang atau naiknya rasio ekivalensi dari nilai 1 akan semakin menurunkan temperatur maksimum yang dapat dicapai.

## BAB VI

### KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Geometri *burner* dan kecepatan aliran udara serta bahan bakar sangat mempengaruhi profil *flat flame* yang terbentuk.
2. Pada model geometri 1, *fuel* serta produk pembakarannya akan memicu terjadinya *flame rollover* yang dapat merusak tube pirolisis serta mempercepat terjadinya *coking*.
3. Model geometri 2 akan menghasilkan profil nyala dari *main fuel* yang berada diantara udara dan *fired wall* sehingga masalah *flame rollover* dapat teratasi.
4. Pada model geometri 2b, sudut  $68^\circ$  pada *wing fuel* yang mengarah ke *fired wall* akan memberikan profil *flat flame* terbaik. Diperlukan perbandingan kecepatan udara terhadap kecepatan *main fuel* dan terhadap kecepatan *wing fuel* secara berurut sebesar 2 : 1 : 2 untuk menghasilkan *flat flame* yang menyala ke arah *fired wall*.
5. Geometri 2b menghasilkan profil nyala melebar dari *wing fuel* yang tidak seragam ke arah vertikal.
6. Geometri 3 menghasilkan profil nyala yang seragam ke arah vertikal namun distribusi panas ke arah horizontal tidak selebar geometri 2b.
7. Pertimbangan pemakaian geometri 2b maupun 3 harus disesuaikan lebih lanjut dengan kondisi yang diinginkan pada *furnace* pirolisis.
8. Semakin tinggi suhu awal bahan bakar maupun udara, seharusnya semakin tinggi temperatur nyala adiabatik pembakaran metana sehingga suhu pembakaran meningkat pula. Namun pada penelitian ini hal tersebut tidak dapat dibuktikan karena kurang akuratnya data viskositas dan densitas yang dipakai.
9. Model rasio ekivalensi 1 memiliki temperatur maksimum tertinggi dibandingkan rasio ekivalensi 0,6; 1,4; dan 3. Berkurang atau bertambahnya rasio ekivalensi dari nilai 1 akan menurunkan temperatur maksimum yang dapat dicapai, namun ternyata diketahui bahwa rasio ekivalensi mempengaruhi profil nyala *flat flame* sehingga diperlukan optimasi nilai rasio ekivalensi dengan pertimbangan-pertimbangan tertentu untuk proses pirolisis.



## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. *Combustion in CFD-5*. Advice for modelling Combusting Flows in CFX-5 p. 445-448.
- Baukal, Charles E. dkk. 2003. *Industrial Burners Handbook*. Edited by Charles E. Baukal, CRC Press.
- Bennett, Dick. *Burner History 102*. Diperoleh dari: [[http://www.process-heating.com/CDA/Articles/Energy\\_Notes/](http://www.process-heating.com/CDA/Articles/Energy_Notes/)]. Diakses pada: Maret 2011.
- Bird, Byron R. dkk. 2001. *Transport Phenomena*. New York : John Willey & Sons, Inc.
- Bray, K.N.C. 1979. *The interaction between turbulence and combustion*, 17th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p. 223.
- Cengel, Y.A. dan Boles M. A. 2006. *Thermodynamics An Engineering Approach*. 5<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill
- Coulson. 2005. *Chemical Engineering Design*. Vol. 6, Elsevier Butterworth-Heinemann
- Gao, Y. dan Chow W.K. 2005. *A Brief Review on Combustion Modeling*. International Journal on Architectural Science, Volume 6, Number 2, p.38-69.
- Krieger, F. J. 1951. *Calculation of Viscosity of Gas Mixtures*. The Rand Corporation, Research Memorandum, California.
- Lee, K. H. dan Baek, S. W. 2010. *Inverse estimation of inlet parameters in diffusion-controlled turbulent combustion in an axisymmetric combustor*. International Journal of Heat and Mass Transfer 53 p.3460-3470.
- NASA *Polynomials*. Diperoleh dari: [[http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/data/nasa\\_plnm.html](http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/data/nasa_plnm.html)]. Diakses pada: Juni 2012.
- NASA *Thermodynamic Files*. Diperoleh dari: [<http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/version30/files30/thermo30.dat>]. Diakses pada: Juni 2012.
- Oprins, A. J. M., dan Heynderickx, G. J. 2002. *Calculation of three-dimensional flow and pressure fields in cracking furnaces*. Ghent University, Belgium.

Rice dan Do. 1995. *Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers*.  
Canada : John Wiley & Sons, Inc.

Tosun, Ismail. 2002. *Modelling in Transport Phenomena*. 1<sup>st</sup> Ed., Netherlands:  
Elsevier Science B.V.

## Lampiran 1. Perhitungan nilai konsentrasi awal udara untuk inputan COMSOL

Kondisi:

$$P = 1,014 \text{ bar}$$

$$T = 1900 \text{ K}$$

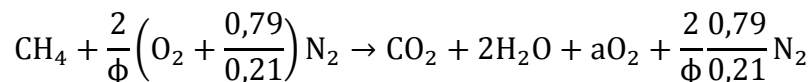
Maka dengan persamaan gas ideal:

$$C_{O_2} = \frac{P \cdot X_{O_2}}{R \cdot T} = \frac{1,014 \text{ bar} \times 0,21}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 1900 \text{ K}} = 1,348 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{N_2} = \frac{P \cdot X_{N_2}}{R \cdot T} = \frac{1,014 \text{ bar} \times 0,79}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 1900 \text{ K}} = 5,071 \text{ mol} / \text{m}^3$$

## Lampiran 2. Perhitungan nilai konsentrasi masukan udara dan *fuel* untuk inputan COMSOL

Reaksi pembakaran global:



- Rasio Ekivalensi ( $\phi$ ) = 1

$$FAR_{actual} = \phi \times FAR_{stoichiometry} = 1 \times \frac{1}{2} = 0,5$$

$$\left( \frac{Fuel}{Air} \right)_{actual} = 0,5$$

$$\frac{X_{fuel}}{1 - X_{fuel}} = 0,5$$

$$X_{fuel} = 0,5 + 0,5X_{fuel}$$

$$X_{fuel} = 0,33$$

$$X_{udara} = 0,67$$

Kondisi:

P = 1 bar

T = 298 K

Maka dengan persamaan gas ideal:

$$C_{CH_4} = \frac{P \cdot X_{CH_4}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,33}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 13,32 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{udara} = \frac{P \cdot X_{udara}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,67}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 27,04 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{O_2} = 0,21 \times 27,04 \text{ mol} / \text{m}^3 = 5,68 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{N_2} = 0,79 \times 27,04 \text{ mol} / \text{m}^3 = 21,36 \text{ mol} / \text{m}^3$$

- Rasio Ekuivalensi ( $\phi$ ) = 0,6

$$FAR_{actual} = \phi \times FAR_{stoichiometry} = 0,6 \times \frac{1}{2} = 0,3$$

$$\left( \frac{Fuel}{Air} \right)_{actual} = 0,3$$

$$\frac{X_{fuel}}{1 - X_{fuel}} = 0,3$$

$$X_{fuel} = 0,3 + 0,3X_{fuel}$$

$$X_{fuel} = 0,23$$

$$X_{udara} = 0,77$$

Kondisi:

P = 1 bar

T = 298 K

Maka dengan persamaan gas ideal:

$$C_{CH_4} = \frac{P \cdot X_{CH_4}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,23}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 9,28 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{udara} = \frac{P \cdot X_{udara}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,77}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 31,08 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{O_2} = 0,21 \times 31,08 \text{ mol/m}^3 = 6,5268 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{N_2} = 0,79 \times 31,08 \text{ mol/m}^3 = 24,5532 \text{ mol/m}^3$$

- Rasio Ekivalensi ( $\phi$ ) = 1,4

$$FAR_{actual} = \phi \times FAR_{stoichiometry} = 1,4 \times \frac{1}{2} = 0,7$$

$$\left(\frac{Fuel}{Air}\right)_{actual} = 0,7$$

$$\frac{X_{fuel}}{1 - X_{fuel}} = 0,7$$

$$X_{fuel} = 0,7 + 0,7X_{fuel}$$

$$X_{fuel} = 0,41$$

$$X_{udara} = 0,59$$

Kondisi:

$$P = 1 \text{ bar}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

Maka dengan persamaan gas ideal:

$$C_{CH_4} = \frac{P \cdot X_{CH_4}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,41}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar/K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 16,55 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{udara} = \frac{P \cdot X_{udara}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,59}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar/K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 23,81 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{O_2} = 0,21 \times 23,81 \text{ mol/m}^3 = 5 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{N_2} = 0,79 \times 23,81 \text{ mol/m}^3 = 18,8 \text{ mol/m}^3$$

- Rasio Ekivalensi ( $\phi$ ) = 3

$$FAR_{actual} = \phi \times FAR_{stoichiometry} = 3 \times \frac{1}{2} = 1,5$$

$$\left(\frac{Fuel}{Air}\right)_{actual} = 1,5$$

$$\frac{X_{fuel}}{1 - X_{fuel}} = 1,5$$

$$X_{fuel} = 1,5 + 1,5X_{fuel}$$

$$X_{fuel} = 0,6$$

$$X_{udara} = 0,4$$

Kondisi:

$$P = 1 \text{ bar}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

Maka dengan persamaan gas ideal:

$$C_{CH_4} = \frac{P \cdot X_{CH_4}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,6}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 24,22 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{udara} = \frac{P \cdot X_{udara}}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ bar} \times 0,4}{8,314 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar} / \text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K}} = 16,14 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{O_2} = 0,21 \times 16,14 \text{ mol} / \text{m}^3 = 3,39 \text{ mol} / \text{m}^3$$

$$C_{N_2} = 0,79 \times 16,14 \text{ mol} / \text{m}^3 = 12,75 \text{ mol} / \text{m}^3$$