



**LAPORAN**  
**TUGAS AKHIR PROYEK**

**SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)  
UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR  
PADA TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY*  
*BRICK SK-34* DAN *AIR SETTING MORTAR TS-140***

**AHMADIO MAULANA SUPRIADI**

06181006

PROGRAM STUDI TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

Jurusan Teknologi Industri

Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri

Institut Teknologi Kalimantan

Balikpapan, 2025



## **LAPORAN TUGAS AKHIR PROYEK**

### **SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD) UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY* *BRICK SK-34* DAN *AIR SETTING MORTAR TS-140***

**AHMADIO MAULANA SUPRIADI**  
06181006

Dosen Pembimbing

**Fikan Mubarak Rohimsyah, S.T., M.Sc.**  
**Rifqi Aulia Tanjung, S.T., M.T.**

PROGRAM STUDI TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Jurusan Teknologi Industri  
Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri  
Institut Teknologi Kalimantan  
Balikpapan, 2025

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD) UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY BRICK SK-34* DAN *AIR SETTING MORTAR TS-140*** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Balikpapan, 29 Desember 2025

Ahmadio Maulana Supriadi  
NIM. 06181006

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

Sebagai sivitas akademik Institut Teknologi Kalimantan, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ahmadio Maulana Supriadi  
NIM : 06181006  
Program Studi : Program Studi Teknik Material Dan Metalurgi  
Jurusan : Jurusan Teknologi Industri  
Fakultas : Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri

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

### **SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD) UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY BRICK* SK-34 DAN *AIR SETTING MORTAR* TS-140**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Institut Teknologi Kalimantan berhak Menyimpan, .

mengalihmediakan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Balikpapan, 29 Desember 2025

Ahmadio Maulana Supriadi  
NIM. 06181006

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan anugerah-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul:

**“SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)  
UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA  
TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY BRICK* SK-34  
DAN *AIR SETTING MORTAR* TS-140”**

Laporan tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan Program Sarjana di Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Jurusan Ilmu Kebumihan dan Lingkungan, Institut Teknologi Kalimantan (ITK) Balikpapan. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Kuasa atas kehadiratnya mampu memberikan semangat hidup kepada saya dalam menyelesaikan laporan ini.
2. Bapak Dedy Supriadi dan Ibu Miranova selaku kedua orang tua yang mendukung baik moril maupun materil dan mendoakan hingga selesainya laporan ini.
3. Bapak Fikan Mubarak Rohimsyah, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Program Studi Teknik Material dan Metalurgi Jurusan Teknologi Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri sekaligus Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Rifqi Aulia Tanjung, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Pendamping.
4. Bapak Ade Wahyu Yusariarta P.P, S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknologi Industri Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri ITK.
5. Bapak Hizkia Alpha Dewanto, S.T., M.Sc. selaku Dosen Wali Program Studi Teknik Material dan Metalurgi Jurusan Teknologi Industri ITK.
6. Bapak dan Ibu Dosen serta Tendik Program Studi Teknik Material dan Metalurgi Jurusan Teknologi Industri ITK.
7. Serta semua pihak yang terlibat dalam dalam proses penyusunan proposal

tugas akhir ini.

Saya menyadari penyusunan proposal tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi kelanjutan proses penyelesaian tugas akhir saya selanjutnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Atas perhatiannya saya ucapkan Terima Kasih.

Balikpapan, Desember 2025

Ahmadio Maulana Supriadi

**SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*  
(CFD) UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI  
TEMPERATUR PADA TUNGKU PELEBURAN  
LOGAM *REFRACTORY BRICK* SK-34 DAN *AIR  
SETTING MORTAR* TS-140**

Nama Mahasiswa	: Ahmadio Maulana Supriadi
NIM	: 06181006
Pembimbing Utama	: Fikan Mubarak Rohimsyah, S.T., M.Sc.
Pembimbing Pendamping	: Rifqi Aulia Tanjung, S.T., M.T.

**ABSTRAK**

Tungku peleburan logam beroperasi pada temperatur hingga 1300°C sehingga memerlukan sistem dinding refraktori yang mampu menjaga optimalisasi panas dan meminimalkan energi. Permasalahan yang umum terjadi adalah distribusi temperatur yang tidak merata di dalam ruang bakar, yang dapat menyebabkan terbentuknya *hot spot*, menurunkan efisiensi termal, serta mempercepat terjadinya kerusakan pada material refraktori. Karakteristik termofisik material dinding khususnya, *air setting mortar* TS-140 dan *refractory brick* SK-34 memiliki dampak signifikan pada kondisi ini. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana karakteristik termal dari dua material tersebut memengaruhi pola distribusi panas dengan mensimulasikan dan menganalisis distribusi temperatur dalam tungku peleburan logam. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi numerik berdasarkan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Karakteristik material SK-34 dan TS-140, metode perpindahan panas konduksi dan konveksi, serta aliran gas panas turbulen diperhitungkan saat membangun model tungku tiga dimensi. Distribusi suhu dinding, gradien panas, dan kemungkinan zona panas berlebih merupakan topik utama analisis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keseragaman temperatur di dalam tungku sangat dipengaruhi oleh perubahan karakteristik termal material dan kondisi aliran gas propana. Kebocoran panas pada sambungan bata berkurang dengan menggunakan mortar TS-140 dengan pemasangan yang rapat. Disimpulkan bahwa metode CFD efektif untuk evaluasi kinerja termal tungku peleburan. Penelitian ini merekomendasikan optimalisasi desain dinding dan konfigurasi aliran gas guna meningkatkan efisiensi energi dan umur pakai refraktori.

**Kata kunci** : CFD, distribusi temperatur, tungku peleburan logam, SK-34, TS-140

**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) SIMULATION  
TO MODEL TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A MELTING  
FURNACE FOR SK-34 REFRACTORY BRICK AND AIR  
SETTING MORTAR TS-140**

By	: Ahmadio Maulana Supriadi
Student Identity Number	: 06181006
Supervisor	: Fikan Mubarak Rohimsyah, S.T., M.Sc.
Co-Supervisor	: Rifqi Aulia Tanjung, S.T., M.T.

**ABSTRACT**

*Metal smelting furnaces operate at temperatures of up to 1300°C, requiring a refractory wall system that can optimize heat and minimize energy consumption. A common problem is uneven temperature distribution within the combustion chamber, which can cause hot spots, reduce thermal efficiency, and accelerate damage to refractory materials. The thermophysical characteristics of wall materials, specifically TS-140 air setting mortar and SK-34 refractory brick, have a significant impact on these conditions. This study aims to evaluate how the thermal characteristics of these two materials affect heat distribution patterns by simulating and analyzing temperature distribution in metal smelting furnaces. The approach used is numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics (CFD). The characteristics of SK-34 and TS-140 materials, conduction and convection heat transfer methods, and turbulent hot gas flow are taken into account when constructing a three-dimensional furnace model. Wall temperature distribution, heat gradients, and the possibility of overheating zones are the main topics of analysis. The simulation results show that the temperature uniformity inside the furnace is greatly influenced by changes in the thermal characteristics of the material and the conditions of the propane gas flow. Heat leakage at the brick joints is reduced by using TS-140 mortar with tight installation. It is concluded that the CFD method is effective for evaluating the thermal performance of smelting furnaces. This study recommends optimizing the wall design and gas flow configuration to improve energy efficiency and the service life of the refractory.*

**Keyword** : CFD, thermal distribution, furnace, refractory brick SK-34, Air setting mortar TS-140



## DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....</b>	<b>4</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>5</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>8</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>9</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>12</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>14</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>15</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Penelitian.....	2
1.5 Urgensi.....	3
1.6 Relevansi dengan Industri atau Akademik.....	3
1.6 Kerangka Penelitian.....	4
<b>BAB 2 METODOLOGI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Computer Fluid Dynamics (CFD).....	5
2.2 Refractory Bricks SK-34.....	5
2.3 Air Setting Mortar TS-140.....	5
2.4 Perpindahan Panas.....	6
2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	7
2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi.....	8

2.5 Konduktivitas Termal.....	8
2.6 Optimasi Pola Aliran Panas.....	9
2.7 Penelitian Terdahulu.....	9
<b>BAB 3 RANCANGAN PROYEK.....</b>	<b>13</b>
3.1 Garis Besar Penelitian.....	13
3.2 Diagram Alir atau Flowchart.....	14
3.3 Prosedur.....	15
3.3.1 Penentuan Desain Utama Geometri.....	15
3.3.2 Penentuan Domain dan Jenis Simulasi.....	16
3.3.3 Jenis simulasi.....	18
3.3.4 Penentuan Boundary Condition inlet dan outlet.....	18
3.3.5 Penentuan Boundary Condition Dinding (Wall).....	20
3.3.6 Penentuan Properti Material.....	21
3.3.7 Penentuan Goal Simulasi Furnace.....	22
3.3.8 Global Goals (GG).....	23
3.3.9 Surface Goals (SG).....	24
3.3.10 Penentuan Mesh (Meshing).....	25
3.3.11 Global Mesh.....	26
3.3.12 Local Mesh 1.....	26
3.3.13 Local Mesh 2.....	27
3.4 Desain.....	28
3.5 Sumber Daya.....	29
3.5.1 Sumber Daya Manusia.....	29
3.5.2 Material dan Bahan.....	30
3.5.3 Alat dan Perangkat.....	30
3.6 Rencana Jadwal.....	31
<b>BAB 4 HASIL PROYEK.....</b>	<b>33</b>
4.1 Gambaran Umum Hasil Simulasi.....	33

4.2 Distribusi Temperatur Gas Panas (Temperature Cut Plot).....	33
4.3 Temperatur Dinding Refractory Brick SK-34.....	35
4.4 Analisis Heat Flux pada Dinding Tungku.....	39
4.5 Analisis Volume Gas Panas Efektif ( Temperature Isosurface ).....	41
4.6 Evaluasi Efektivitas dan Inovasi Proyek.....	44
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>45</b>
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran.....	45
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>47</b>
<b>LAMPIRAN A.....</b>	<b>49</b>
RIWAYAT PENULIS.....	49
<b>LAMPIRAN B.....</b>	<b>50</b>
<b>RIWAYAT PENULIS.....</b>	<b>51</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka Penelitian.....	4
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	15
Gambar 3.2 <i>Cylinder furnace</i> .....	15
Gambar 3.3 <i>Inlet dan outlet cylinder furnace</i> .....	16
Gambar 3.4 Penentuan Domain.....	17
Gambar 3.5 <i>Section view</i> penentuan domain.....	17
Gambar 3.6 <i>Unit system</i> CFD.....	18
Gambar 3.7 Penentuan <i>Boundary Condition</i> .....	19
Gambar 3.8 <i>Boundary Condition Inlet</i> .....	19
Gambar 3.9 <i>Boundary Condition Outlet</i> .....	20
Gambar 3.10 <i>Boundary Condition</i> Dinding ( <i>Wall</i> ).....	21
Gambar 3.11 Penentuan Properti Material.....	22
Gambar 3.12 Penentuan <i>Goals</i> Simulasi CFD.....	22
Gambar 3.13 Penentuan <i>Global Goals</i> Simulasi CFD.....	23
Gambar 3.14 Penentuan <i>Surface Goals</i> (SG) Simulasi CFD.....	24
Gambar 3.15 Penentuan <i>Mesh</i> ( <i>Meshing</i> ).....	25
Gambar 3.16 Penentuan <i>Global Mesh</i> Simulasi CFD.....	26
Gambar 3.17 Penentuan <i>Local Mesh</i> 1 Simulasi CFD.....	27
Gambar 3.18 Penentuan <i>Local Mesh</i> 2 Simulasi CFD.....	28
Gambar 3.19 Desain Tungku Peleburan Logam ( <i>Furnace</i> ).....	29
Gambar 4.1 Temperatur <i>cut plot</i> sudut 0° pada sumbu.....	33
Gambar 4.2 Temperatur <i>cut plot</i> sudut 10° pada sumbu.....	33
Gambar 4.3 Temperatur <i>cut plot</i> sudut 20° pada sumbu.....	34
Gambar 4.4 Temperatur pada <i>surface plot wall</i> SK-34 pada sudut 10°.....	35
Gambar 4.5 Temperatur pada <i>surface plot wall</i> SK-34 pada sudut 0°.....	36
Gambar 4.6 Temperatur pada <i>surface plot wall</i> SK-34 pada sudut 20°.....	37
Gambar 4.7 <i>Surface plot-heat flux</i> sudut 0° pada <i>cylinder furnace</i> .....	38
Gambar 4.8 <i>Surface plot-heat flux</i> sudut 10° pada <i>cylinder furnace</i> .....	39
Gambar 4.9 <i>Surface plot-heat flux</i> sudut 20° pada <i>cylinder furnace</i> .....	40

Gambar 4.10 Temperatur <i>isosurface</i> (1273 K & 1073 K) pada sudut $0^\circ$ .....	41
Gambar 4.11 Temperatur <i>isosurface</i> (1273 K & 1073 K) pada sudut $10^\circ$ .....	42
Gambar 4.12 Temperatur <i>isosurface</i> (1273 K & 1073 K) pada sudut $20^\circ$ .....	43

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	9
Tabel 3.1 Rencana Penelitian.....	31

## DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
$T$	Temperatur	K atau $^{\circ}\text{C}$
$\Delta T$	Perbedaan temperatur	K
$q$	Laju perpindahan panas	W
$q''$	Fluks panas	$\text{W}/\text{m}^2$
$k$	Konduktivitas termal material	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
$h$	Koefisien perpindahan panas konveksi	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
$A$	Luas permukaan/penampang	$\text{m}^2$
$x, y, z$	Koordinat spasial	m
$dT/dx$	Gradien temperatur	$\text{K}/\text{m}$
$\rho$	Densitas fluida	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\mu$	Viskositas dinamik	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
$\nu$	Viskositas kinematik	$\text{m}^2/\text{s}$
$c_p$	Kalor jenis	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$v$	Kecepatan fluida	$\text{m}/\text{s}$
$\dot{m}$	Laju alir massa	$\text{kg}/\text{s}$
$p$	Tekanan	Pa

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses peleburan logam merupakan tahapan penting dalam industri pengecoran yang membutuhkan pengendalian temperatur secara optimal untuk memastikan kualitas logam cair dan efisiensi konsumsi energi. Tungku peleburan umumnya dilapisi material refraktori yang berfungsi menahan panas agar tidak terjadi kehilangan energi secara berlebihan ke lingkungan. Pemilihan material refraktori yang tepat, seperti *refractory bricks* SK-34 dan *air setting mortar* TS-140, memiliki pengaruh signifikan terhadap performa termal tungku, umur pakai, serta keselamatan operasional.

*Refractory bricks* SK-34 dikenal memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, konduktivitas termal yang baik, serta stabilitas fisik dan kimia pada lingkungan panas ekstrem. Sementara itu, *air setting mortar* TS-140 digunakan sebagai material perekat antar bata refraktori yang juga berperan sebagai lapisan pelindung terhadap difusi panas. Kombinasi kedua material ini diharapkan mampu memberikan ketahanan panas yang optimal pada konstruksi tungku peleburan. Untuk mengevaluasi kinerja lapisan refraktori tersebut, metode eksperimental langsung seringkali membutuhkan biaya tinggi, waktu yang lama, serta memiliki keterbatasan dalam memantau distribusi temperatur pada seluruh bagian tungku. Oleh karena itu, metode pemodelan numerik seperti *Computational Fluid Dynamics (CFD)* menjadi solusi yang relevan dan efisien. CFD mampu memvisualisasikan perilaku aliran fluida panas, perpindahan panas secara konduksi dan konveksi serta distribusi temperatur pada setiap lapisan material refraktori. Melalui simulasi CFD, analisis mengenai karakteristik distribusi temperatur pada tungku yang menggunakan *refractory brick* SK-34 dan *air setting mortar* TS-140 dapat dilakukan secara komprehensif. Hasil simulasi ini dapat menjadi dasar untuk meningkatkan desain struktur tungku, efisiensi penggunaan energi, serta memperpanjang umur pakai material refraktori dalam aplikasi industri pengecoran logam.



Dengan demikian, penelitian mengenai pemodelan distribusi temperatur menggunakan CFD pada tungku peleburan bukan hanya memberi kontribusi terhadap pengembangan teknologi material refraktori, tetapi juga memiliki dampak langsung terhadap peningkatan performa proses produksi di industri manufaktur logam.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah yang didapatkan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi temperatur pada tungku peleburan logam dengan menggunakan material *refractory bricks* SK-34 dan *air setting mortar* TS-140?
2. Bagaimana pengaruh perbedaan sifat termofisika material SK-34 dan TS-140 terhadap pola sebaran panas, gradien, dan potensi *hot spot* pada tungku?

## **1.3 Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dibuat, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui distribusi temperatur pada tungku peleburan logam dengan menggunakan material *refractory bricks* SK-34 dan *air setting mortar* TS-140.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan sifat termofisika material SK-34 dan TS-140 terhadap pola sebaran panas, gradien, dan potensi *hot spot* pada tungku.

## **1.4 Batasan Penelitian**

Adapun batasan yang dimiliki proyek ini yaitu:

1. Analisis hanya difokuskan pada distribusi temperatur pada dinding tungku peleburan, tidak mencakup analisis tegangan termal atau kegagalan mekanik.
2. Proyek simulasi dilakukan hanya sebatas pada material *refractory bricks*

SK-34 dan *air setting mortar* TS-140.

3. Simulasi CFD hanya dilakukan pada mekanisme perpindahan panas tanpa melibatkan reaksi kimia pada tungku bakar.

### **1.5 Urgensi**

Adapun urgensi yang dimiliki proyek ini yaitu :

1. distribusi temperatur menentukan stres termal, retak, dan kegagalan material berdampak langsung pada keselamatan operasi dan biaya perawatan
2. optimasi pola panas bisa menurunkan konsumsi bahan bakar dan kehilangan panas, meningkatkan efisiensi proses peleburan
3. suhu tidak homogen dapat mempengaruhi proses peleburan dan kualitas logam/hasil akhir.

### **1.6 Relevansi dengan Industri atau Akademik**

Adapun relevansi proyek ini dengan akademik dan industri yaitu:

Akademik

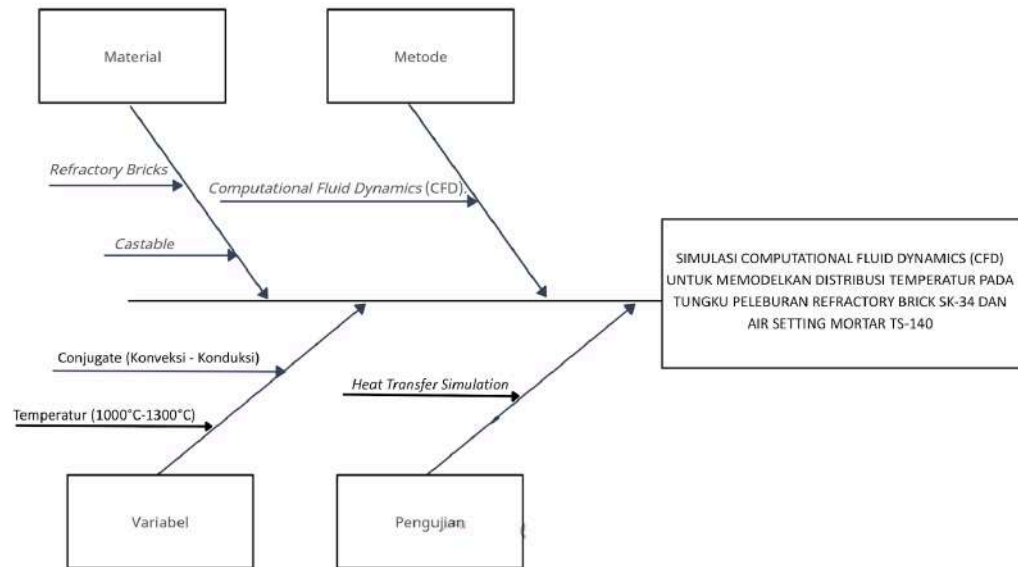
1. Menambah wawasan mengenai penerapan simulasi CFD dalam analisis perpindahan panas pada tungku peleburan.
2. Memberikan referensi ilmiah terkait performa termal material refraktori SK-34 dan TS-140.
3. Menjadi sumber pembelajaran bagi mahasiswa dalam memahami hubungan antara sifat material, desain tungku, dan kinerja termal

Industri.

1. Memberikan data dan evaluasi untuk membantu Institut Teknologi Kalimantan dalam menentukan material refraktori yang sesuai dengan kebutuhan operasional.
2. Mendukung peningkatan efisiensi energi dan umur pakai tungku melalui pemilihan material refraktori yang optimal.
3. Mengurangi biaya operasional dan perawatan tungku melalui desain yang lebih terukur berdasarkan hasil simulasi CFD.

## 1.6 Kerangka Penelitian

Adapun kerangka penelitian yang disusun dalam Fishbone diagram adalah sebagai berikut:



**Gambar 1.1** Kerangka Penelitian

## **BAB 2**

### **METODOLOGI**

#### **2.1     *Computer Fluid Dynamics (CFD)***

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan teknik pemodelan numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku fluida dan perpindahan panas dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, serta energi dalam bentuk terdiskritisasi. Metode ini memungkinkan visualisasi pola aliran fluida, distribusi temperatur, dan fenomena turbulensi pada geometri kompleks seperti ruang bak tungku peleburan. Dengan menggabungkan model turbulensi, konveksi, dan radiasi, CFD dapat mengevaluasi kinerja termal dan efisiensi sistem tanpa memerlukan eksperimen fisik berskala besar (Tu et al., 2018). Oleh karena itu, CFD banyak digunakan dalam industri metalurgi untuk memprediksi kondisi operasi optimal dan mencegah kerusakan komponen pada temperatur tinggi (Anderson, 2017).

#### **2.2     *Refractory Bricks SK-34***

*Refractory bricks* tipe SK-34 adalah material alumina-silika yang dikategorikan sebagai *fire clay brick* dengan kandungan alumina sekitar 35–40%. Karakteristik utamanya meliputi ketahanan terhadap suhu tinggi hingga  $\pm 1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ , ketahanan kimia terhadap slag, dan kekuatan mekanik yang stabil pada pembebanan termal (Gupta & Krishnamurthy, 2019). Konduktivitas termal pada *refractory bricks* SK-34 relatif rendah sebesar  $0.25\text{--}0.5\text{W/m}\cdot\text{k}$  membantu menekan kehilangan panas sehingga meningkatkan efisiensi energi tungku. Selain itu, material ini memiliki ketahanan kejutan termal yang baik, sehingga banyak digunakan sebagai pelapis dinding ruang bak peleburan logam berbasis tembaga maupun aluminium (Hossain et al., 2020).

#### **2.3     *Air Setting Mortar TS-140***

*Air setting mortar* adalah mortar tahan api yang mampu mengeras pada kondisi lingkungan tanpa perlakuan panas tambahan. Mortar TS-140 berfungsi

sebagai perekat antar batu tahan api dengan ketahanan panas tinggi dan stabilitas dimensional yang mendukung integritas struktur dinding tungku (Kartikasari & Nugroho, 2022). Mortar ini membantu mencegah kebocoran gas panas serta menjaga distribusi panas agar tidak terkonsentrasi pada celah sambungan material. Sifat mekanik dan konduktivitas termalnya sangat penting karena perpindahan panas juga berlangsung melalui jalur mortar, sehingga kualitas mortar menentukan umur operasi tungku.

## 2.4 Perpindahan Panas

Perpindahan kalor/panas dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada tiga jenis cara perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Analisis Konduktifitas Termal Pada Material Logam (Tembaga, Aluminium Dan Baja karbon). Merupakan konduksi proses perpindahan energi dari tempat yang bertemperatur tinggi ke tempat yang bertemperatur rendah, akibat adanya pergerakan elektron panas akan berpindah secara estafet dari satu partikel ke partikel yang lainnya dalam medium tersebut. Konveksi merupakan proses perpindahan energi panas melalui pergerakan molekul-molekul fluida (gas dan cair) akibat adanya perbedaan temperatur. Sedangkan radiasi merupakan proses perpindahan energi panas tanpa melalui medium perantara. Radiasi terjadi pada setiap benda dimana suatu benda memancarkan gelombang elektromagnetik dengan flux radiasi yang ditentukan oleh temperatur benda tersebut (Hukum Stefan-Boltzman).

Menurut J.P Holman (terjemahan Ir. E. Jasifi, M. Sc, 2018:1), “Perpindahan kalor atau alih bahan (*heat transfer*) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material”. Frank Keith (terjemahan Arko Prijono, M. Sc, 2018:1) berpendapat “Bila dalam suatu sistem terdapat gradien suhu atau bila dua sistem yang suhunya berbeda disinggungkan maka akan terjadi perpindahan energi. Proses dengan transport energi itu berlangsung disebut sebagai perpindahan panas”.

Proses perpindahan panas secara konduksi adalah suatu proses perpindahan energi panas dimana energi panas tersebut mengalir dari daerah yang

bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah dalam suatu medium padat atau fluida yang diam. Persamaan umum laju konduksi untuk perpindahan panas dengan cara konduksi dikenal dengan hukum Fourier (Fourier's law) yang dipersamakan seperti dibawah :

$$qk = -k. A. \frac{dt}{dx} \quad (2.1)$$

dengan :

$qk$  = laju perpindahan panas konduksi (Watt)

$k$  = konduktivitas termal bahan (W/moC)

$A$  = luas penampang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m<sup>2</sup>)

$dt/dx$  = gradient temperature terhadap arah x (C/m)

#### 2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi

Proses perpindahan panas secara konduksi adalah suatu proses perpindahan energi panas dimana energi panas tersebut mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah dalam suatu medium padat atau fluida yang diam atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dasar hukum yang digunakan dalam perpindahan panas konduksi adalah hukum Fourier (Fourier's law) yang menyatakan bahwa tingkat (*rate*) perpindahan panas melalui sebuah material adalah berbanding lurus dengan gradien negatif pada suhu dan luas, pada sudut siku pada gradien tersebut. Melalui dimana panas mengalir. Dengan persamaan seperti dibawah:

$$qk = k. A. \frac{T_1 - T_2}{dx} = - k. A. \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Dengan:

$qk$  = laju perpindahan panas konduksi (Watt)

$k$  = konduktivitas termal bahan (W/moC)

$A$  = luas penampang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  = gradient suhu terhadap arah x (C/m)

#### 2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari suatu permukaan media padat atau fluida yang diam menuju fluida yang mengalir atau bergerak. Laju perpindahan panas konveksi mengacu pada hukum Newton tentang pendinginan (*Newton's Law Of Cooling*) (Incropera and dewit).

#### 2.5 Konduktivitas Termal

Nilai konduktivitas yang rendah pada material tahan api sangat krusial untuk menahan aliran panas dari ruang bak menuju lingkungan (Incropera et al., 2017). Pada temperatur tinggi, struktur mikro material tahan api dapat berubah sehingga konduktivitas termal meningkat—sebab itu sifat termofisik harus dimodelkan sebagai fungsi temperatur dalam simulasi numerik (Harris & Rimkute, 2020). Kombinasi bata SK-34 dan mortar TS-140 dengan konduktivitas rendah akan mengurangi rugi panas, memperbaiki kestabilan termal, serta memperpanjang usia struktur dinding tungku. Konduktivitas termal suatu benda merupakan kemampuan yang dimiliki suatu benda dalam memindahkan kalor melalui benda tersebut. Benda yang mempunyai konduktivitas termal ( $k$ ) yang tinggi maka merupakan penghantar kalor yang baik, begitu sebaliknya. Berdasarkan hukum *Fourier* yang berlaku pada perpindahan panas konduksi,

$$qk = -k \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (2.3)$$

Maka persamaan untuk mencari nilai konduktivitas termal dari suatu bahan adalah:

$$k = - \frac{qk}{A} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2.4)$$

dengan:

$k$  = konduktivitas termal bahan (W/moC);

$qk$  = laju perpindahan panas konduksi (Watt);

$A$  = luas penampang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m<sup>2</sup>);

$\frac{dt}{dx}$  = gradient temperature terhadap arah x (C/m)

## 2.6 Optimasi Pola Aliran Panas

Optimasi pola aliran gas panas bertujuan menghasilkan distribusi temperatur yang merata, meningkatkan efisiensi energi, serta mengurangi potensi kerusakan material. Optimasi ini dapat dilakukan dengan:

1. Mengubah geometri ruang bakar.
2. Menyesuaikan ukuran dan posisi *burner*.
3. Mengatur kecepatan dan arah aliran gas masuk.
4. Menggunakan variasi sudut injeksi atau bentuk saluran.

Dalam SolidWorks Flow Simulation, optimasi dilakukan melalui pendekatan iteratif dengan membandingkan beberapa model desain hingga ditemukan konfigurasi yang memberikan pola aliran paling stabil dan efisiensi panas paling tinggi.

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Berikut ini merupakan rangkuman hasil penelitian yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

**Tabel 2.1** Penelitian Terdahulu

No	Nama & Tahun Publikasi	Hasil
1.	Rahim, Riupassa, 2017	<p><b>Metode</b> : Simulasi CFD Distribusi Temperatur menggunakan Ansys 14.5 pada Destilitator Tenaga Surya</p> <p><b>Hasil</b> : Distribusi temperatur untuk plat bentuk datar adalah tembaga 44,5°C, aluminium 43,91°C dan <i>stainless steel</i> 42,01°C. Untuk bentuk gelombang tembaga 42,8°C, aluminium 42,08°C, dan <i>stainless steel</i> 41,45°C. Rata - rata fluks kalor 581 W/m<sup>2</sup>. Besar konveksi yang terjadi pada plat datar tembaga 121,108 Watt, aluminium 118,517 Watt, dan <i>stainless steel</i> 105,05 Watt; sedangkan pada bentuk gelombang tembaga 118,185 W, aluminium 113,375 W, dan <i>stainless</i></p>



	<p><i>steel</i> 101,45 Watt. Energi radiasi untuk plat datar tembaga 16,14 W, aluminium 13,49 W dan <i>stainless steel</i> 29,93 W sedangkan untuk bentuk gelombang tembaga 17,48 W, aluminium 6,02 W dan <i>stainless steel</i> 30,54 W..</p>
2. Wira Febrian, DKK, 2023	<p><b>Metode</b> : Analisis Distribusi Panas pada Variasi Posisi Pipa dan Diameter Pipa Penghantar Panas terhadap Efisiensi Pengeringan Rengginang Menggunakan <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD)</p> <p><b>Hasil</b> : Menunjukkan posisi 3 (pipa dibelakang horizontal dan pipa berukuran 1 inch) mendistribusikan udara panas yang cukup merata keseluruhan bagian rak mesin pengering rengginang otomatis, yang memiliki temperatur paling tinggi di sensor ke 3 dan paling rendah di sensor ke 4. Posisi ini memiliki rata - rata temperatur 46,9°C dan toleransi temperatur 2,1°C. Kemudian melakukan validasi eksperimen dengan hasil &lt;5% dan didapatkan laju pengeringan rengginang sebesar 1,04 g/menit atau 0,0624 kg/jam serta efisiensi pengeringan rengginang sebesar 1,25%.</p>
3. Sarifudin Alif, Riki Effendi, 2025	<p><b>Metode</b> : Optimisasi Perpindahan Panas dan Efisiensi Sistem Ekstraksi Minyak Kemiri melalui Pendekatan Eksperimental dan Simulasi CFD</p> <p><b>Hasil</b> : Simulasi CFD menunjukan distribusi temperatur maksimum sebesar 383,2 K dengan deviasi rata - rata 2,1%</p>

---

dibandingkan hasil eksperimen, yang menunjukkan kecocokan antara model dan kondisi nyata. Kombinasi pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh tentang fenomena termal pada sistem, sebagai dasar untuk pengembangan desain pemanas yang lebih efisien di masa mendatang.

---

4. Ismail, Agus Purwanto,  
2025

**Metode :** Analisis Distribusi Udara Dan Panas Pada Pengering Rumah Kaca Dan Rak Susun

**Hasil :** Hasil eksperimen yang telah dilakukan didapatkan data pengeringan dengan menggunakan rak susun lebih unggul sekitar 1,8% - 2,97% dalam hal pengurangan massa, dan 0,01 °C - 0,23 °C untuk suhu, serta 0,46% - 0,61% untuk humidity, dibandingkan dengan pengering rumah kaca.

---

5. Iful Rumanto, Sunaryo,  
Akhmad Irfan, 2020

**Metode:** ANALISIS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) PENYEBARAN PANAS PADA DAPUR PELEBURAN ALUMINIUM

**Hasil :** Simulasi dari variasi pertama menghasilkan temperatur tertinggi 706.15 °C dan temperatur terendah 604.65 °C, variasi kedua menghasilkan temperatur tertinggi 688 °C dan temperatur terendah 526.65 °C, dan variasi ketiga menghasilkan temperature tertinggi 704.30 °C dan temperature terendah 535.75 °C. Dari hasil simulasi menunjukan bahwa variasi

---

---

pertama dengan bentuk tungku hexagon  
memiliki sebaran panas paling baik.

---

## BAB 3

### RANCANGAN PROYEK

Bagian ini menjelaskan secara sistematis tahapan perancangan, analisis, dan proses optimasi desain tungku peleburan logam menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Rancangan proyek terdiri dari garis besar alur pengerjaan, diagram alir, prosedur teknis, desain geometri, serta konfigurasi simulasi yang digunakan dalam penelitian

#### 3.1 Garis Besar Penelitian

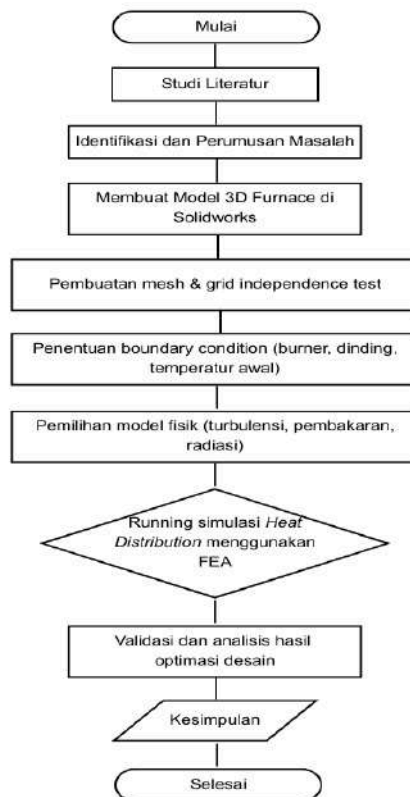
Proyek ilmiah ini berfokus pada pemodelan dan analisis distribusi temperatur dalam tungku peleburan logam yang menggunakan lapisan refraktori berupa *refractory brick* SK-34 dan *air setting mortar* TS-140 melalui pendekatan *computational fluid dynamics* (CFD). Kajian ini bertujuan memahami perilaku termal di dalam ruang bakar, termasuk pola aliran gas panas, perpindahan panas melalui dinding refraktori, dan potensi terbentuknya titik panas yang dapat mempercepat degradasi material. Penelitian akan dimulai dengan studi literatur mengenai konsep CFD, perpindahan panas konjugasi (*conjugate heat transfer*), serta sifat termofisika kedua material refraktori yang menjadi fokus. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data properti termal material seperti konduktivitas, kapasitas panas, densitas, serta emisivitas yang diperlukan untuk model numerik.

Tahap pemodelan dimulai dari pembuatan geometri tungku, kemudian dilanjutkan dengan proses pembuatan mesh yang divalidasi melalui studi independensi mesh untuk memastikan ketelitian simulasi. Model CFD akan menggunakan persamaan Navier–Stokes dan energi untuk memodelkan interaksi fluida-padat, dilengkapi model turbulensi yang sesuai seperti  $k-\epsilon$  atau  $k-\omega$  SST, serta model radiasi termal seperti *discrete ordinates* untuk mengakomodasi karakteristik suhu tinggi. Kondisi batas ditetapkan berdasarkan karakteristik operasi tungku nyata, termasuk laju alir dan temperatur gas panas pada *inlet*, tekanan pada *outlet*, serta mekanisme perpindahan panas dari dinding luar ke lingkungan. Simulasi akan dijalankan dalam kondisi *steady-state* sebagai

*baseline*, dan apabila diperlukan dapat dikembangkan ke mode transient untuk menganalisis dinamika pemanasan awal. Hasil simulasi kemudian dianalisis dalam bentuk visualisasi peta temperatur, profil distribusi temperatur pada ketebalan dinding refraktori, serta nilai *heat flux* yang menjadi indikator terjadinya tekanan termal pada struktur. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter operasi seperti laju alir gas, konfigurasi *burner*, dan ketebalan mortar terhadap performa termal tungku. Apabila data lapangan tersedia, dilakukan proses validasi untuk memastikan akurasi model. Luaran penelitian terkait desain dan operasi yang mampu meningkatkan efisiensi temperatur tungku, mengurangi laju kerusakan material, serta memperpanjang umur pemakaian tungku peleburan logam. Hasil akhir disusun dalam laporan ilmiah disertai dokumentasi pemodelan serta interpretasi menyeluruh atas temuan simulasi.

### 3.2 Diagram Alir atau *Flowchart*

Berikut adalah diagram alir yang digunakan pada penelitian ini:

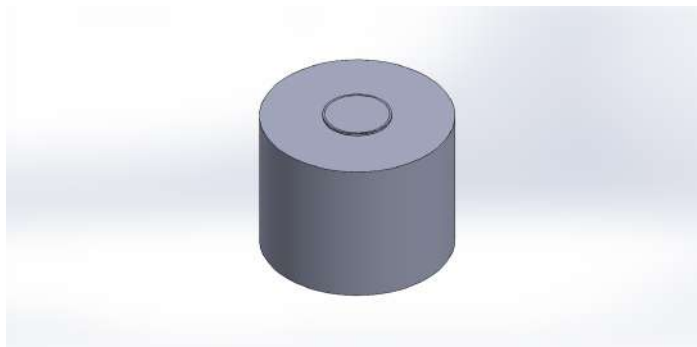


**Gambar 3.1** Diagram Alir

### 3.3 Prosedur

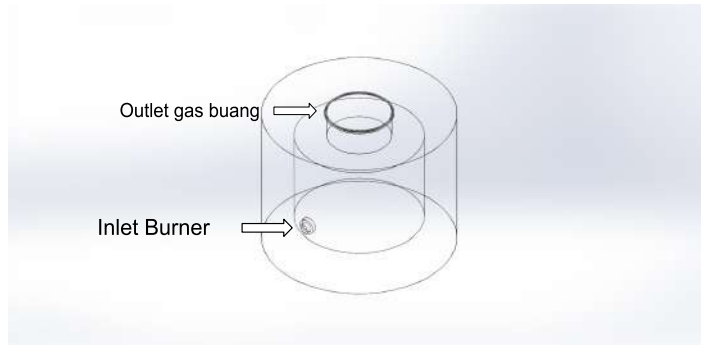
#### 3.3.1 Penentuan Desain Utama Geometri

Tahap *preprocessing* ini merupakan tahapan awal dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi fluida (CFD). Dalam tahapan *preprocessing* ini terdiri dari beberapa sub tahapan mulai dari pembuatan geometri menggunakan *software CAD solidwork*. Pemodelan geometri tungku pada simulasi ini dilakukan dengan merepresentasikan bentuk fisik *cylinder furnace* ke dalam model tiga dimensi. Tungku dimodelkan sebagai ruang bakar berbentuk silinder dengan sumbu utama vertikal, yang mencerminkan konfigurasi aktual furnace pada aplikasi peleburan logam. Di dalam model tersebut terdapat ruang bakar utama, inlet burner, serta outlet gas buang yang berfungsi sebagai jalur keluarnya gas hasil pembakaran.



**Gambar 3.2** *Cylinder furnace*

*Burner* ditempatkan secara simetris pada sisi dinding tungku dengan orientasi sudut tertentu terhadap sumbu horizontal. Variasi sudut *burner* yang digunakan dalam simulasi, yaitu  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ , dan  $20^\circ$  dimodelkan secara eksplisit untuk melihat pengaruh arah injeksi gas panas terhadap pola aliran dan distribusi temperatur di dalam ruang bakar. Dinding tungku dimodelkan sebagai lapisan refraktori yang membatasi domain fluida dan berperan sebagai media perpindahan panas antara gas panas dan struktur tungku.



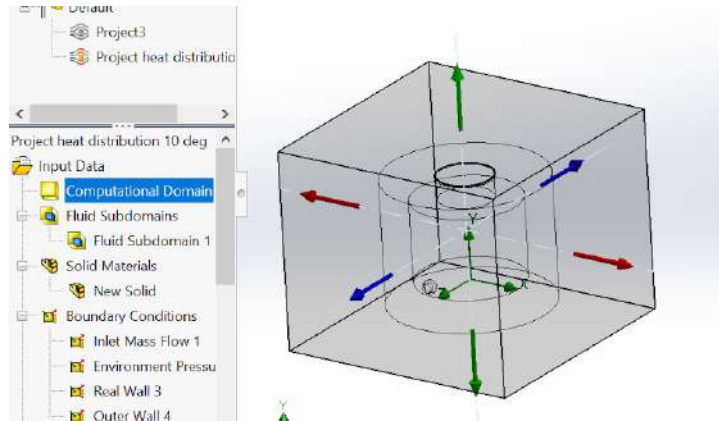
**Gambar 3.3** *Inlet dan outlet cylinder furnace*

Model geometri ini dirancang untuk menangkap fenomena utama yang terjadi di dalam *furnace*, khususnya pembentukan aliran swirl, penyebaran gas panas, serta interaksi aliran dengan dinding refraktori, tanpa menambahkan detail geometris yang tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi.

Dimensi utama tungku ditentukan berdasarkan spesifikasi desain *furnace* yang digunakan dalam proyek ini. Parameter geometris yang dimodelkan meliputi diameter ruang bakar silinder yaitu 30 cm, tinggi ruang bakar yaitu 23 cm, tinggi total *furnace* yaitu 35 cm, diameter inlet *burner* yaitu 2,54 cm, serta diameter outlet gas buang 15 cm. Dimensi-dimensi tersebut digunakan sebagai acuan dalam membangun domain fluida dan menentukan karakteristik aliran gas panas di dalam tungku.

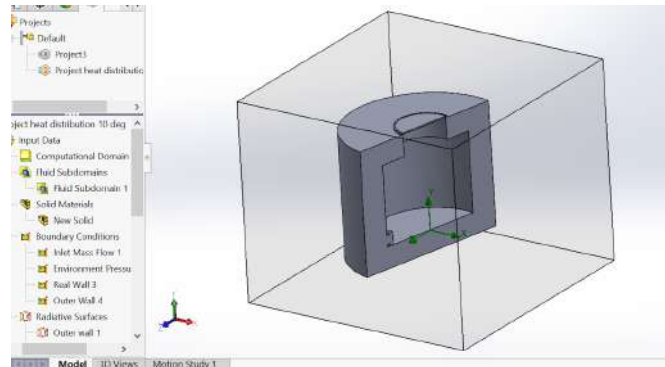
### 3.3.2 Penentuan *Domain* dan Jenis Simulasi

Pada tahap simulasi CFD, penentuan domain fluida dilakukan untuk mendefinisikan ruang di mana aliran gas panas dan proses perpindahan panas berlangsung. Dalam penelitian ini, domain fluida ditetapkan sebagai volume internal *cylinder furnace* yang dilewati oleh gas hasil pembakaran, mulai dari area masuk burner hingga menuju saluran keluaran gas buang



**Gambar 3.4** Penentuan *Domain*

Bagian dinding tungku yang tersusun dari material refraktori SK-34 tidak dimasukkan ke dalam domain fluida, melainkan diperlakukan sebagai batas fisik yang membatasi pergerakan fluida. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan interaksi termal antara gas panas dan dinding tungku melalui mekanisme perpindahan panas konveksi tanpa harus memasukkan volume padat ke dalam domain perhitungan fluida.



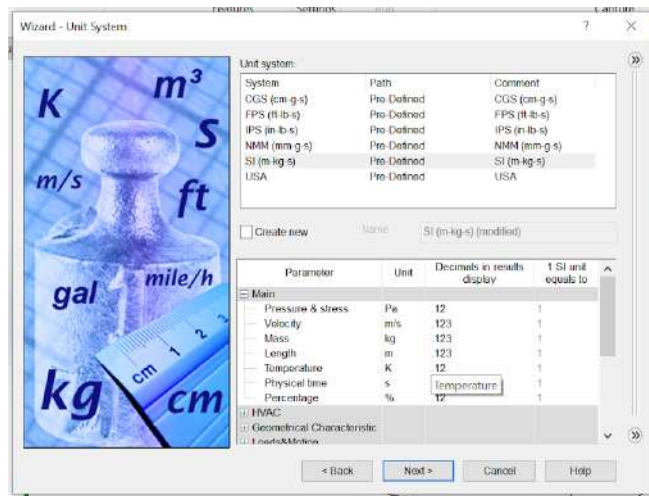
**Gambar 3.5** *Section view* penentuan *domain*

Pembatasan domain hanya pada ruang bakar dilakukan untuk memfokuskan analisis pada fenomena utama yang dikaji, yaitu pola aliran gas panas, pembentukan *swirl*, serta distribusi temperatur di dalam *furnace*, sehingga simulasi dapat berjalan lebih efisien dan terarah.



### 3.3.3 Jenis simulasi

Simulasi yang diterapkan pada penelitian ini menggunakan pendekatan kondisi tunak (*steady-state*). Pemilihan jenis simulasi ini didasarkan pada tujuan analisis, yaitu mengevaluasi performa termal dan karakteristik aliran *furnace* pada kondisi operasi normal setelah sistem mencapai keadaan stabil.



Gambar 3.6 Unit system CFD

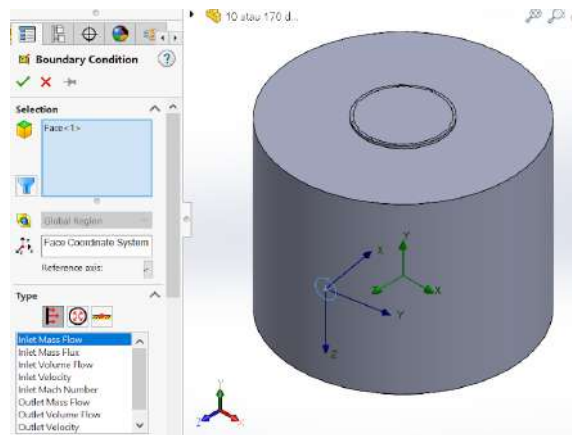
Dalam simulasi *steady-state*, variabel aliran seperti kecepatan, tekanan, dan temperatur dianggap tidak mengalami perubahan terhadap waktu. Pendekatan ini dinilai representatif untuk menggambarkan kondisi kerja *furnace* dalam jangka waktu operasi kontinu. Selain itu, penggunaan simulasi *steady-state* memungkinkan perbandingan antar variasi sudut *burner* dilakukan secara konsisten dengan kebutuhan komputasi yang lebih efisien dibandingkan simulasi tidak tunak (*transient*).

Meskipun proses awal pembakaran bersifat dinamis, analisis pada kondisi tunak tetap memberikan informasi yang cukup akurat terkait distribusi aliran dan panas di dalam ruang bakar.

### 3.3.4 Penentuan *Boundary Condition inlet* dan *outlet*

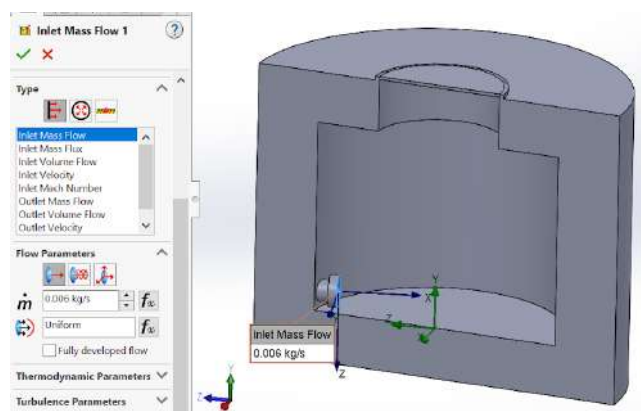
Penentuan kondisi batas merupakan tahap krusial dalam simulasi CFD karena berfungsi untuk merepresentasikan kondisi operasi nyata dari *cylinder*

*furnace*. Kondisi batas yang tepat memungkinkan simulasi menggambarkan interaksi antara fluida dan lingkungan sekitarnya secara realistis, serta memastikan hasil perhitungan numerik sesuai dengan tujuan analisis. Pada penelitian ini, kondisi batas ditetapkan pada bagian inlet *burner*, outlet gas buang, dan dinding tungku (*wall*).



**Gambar 3.7** Penentuan *Boundary Condition*

Bagian inlet merepresentasikan lokasi masuknya gas panas ke dalam *furnace* melalui *burner*. Pada bagian ini, kondisi batas ditetapkan berupa kecepatan aliran dan temperatur masuk. Nilai kecepatan inlet diberikan sesuai dengan kondisi operasi *burner* yang dianalisis, sehingga mampu menghasilkan aliran gas panas yang cukup untuk membentuk pola swirl di dalam ruang bakar.

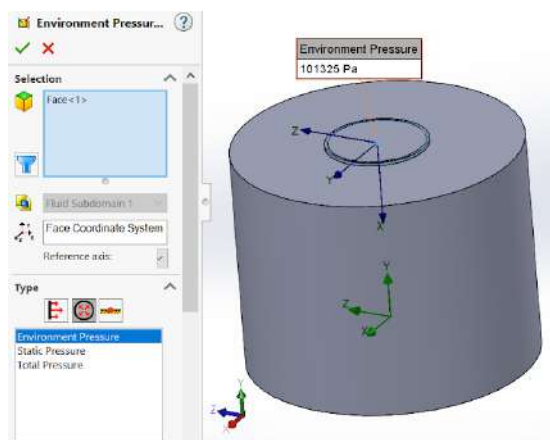


**Gambar 3.8** *Boundary Condition* Inlet

Temperatur inlet ditetapkan sebagai temperatur gas panas hasil pembakaran yang masuk ke *furnace*. Penetapan temperatur ini bertujuan untuk

merepresentasikan energi termal awal yang dibawa oleh fluida ke dalam sistem. Selain itu, arah aliran inlet diatur berdasarkan variasi sudut *burner* yang digunakan dalam simulasi, yaitu  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ , dan  $20^\circ$ , sehingga pengaruh orientasi *burner* terhadap pola aliran dan distribusi temperatur dapat dianalisis secara komparatif.

Bagian outlet merepresentasikan jalur keluarnya gas hasil pembakaran dari *furnace* menuju lingkungan luar. Pada *outlet*, kondisi batas ditetapkan sebagai tekanan statis yang disesuaikan dengan tekanan lingkungan. Pendekatan ini memungkinkan fluida keluar dari domain simulasi secara alami tanpa memaksakan arah atau kecepatan tertentu.



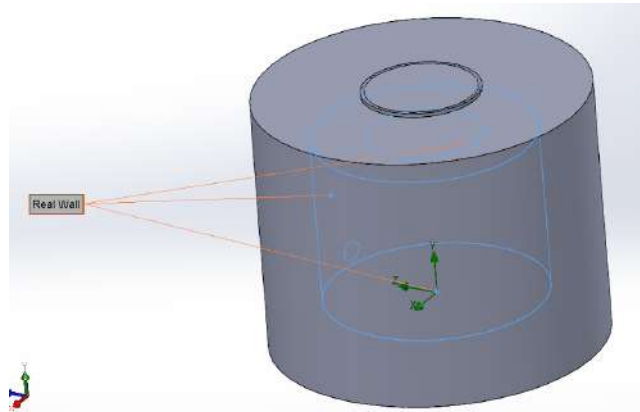
**Gambar 3.9** *Boundary Condition Outlet*

Dengan menggunakan kondisi tekanan pada *outlet*, stabilitas aliran dapat terjaga dan potensi terjadinya refleksi aliran balik (*backflow*) dapat diminimalkan. Penetapan kondisi ini juga membantu simulasi mencapai konvergensi yang lebih stabil, terutama pada aliran gas panas dengan karakteristik turbulen.

### 3.3.5 Penentuan *Boundary Condition Dinding (Wall)*

Dinding *furnace* dimodelkan sebagai batas padat (*wall*) yang memisahkan domain fluida dengan struktur tungku. Pada seluruh permukaan dinding, diterapkan kondisi *no-slip*, di mana kecepatan fluida pada permukaan dinding dianggap nol. Asumsi ini umum digunakan dalam simulasi aliran fluida

untuk merepresentasikan interaksi viskos antara fluida dan permukaan padat.

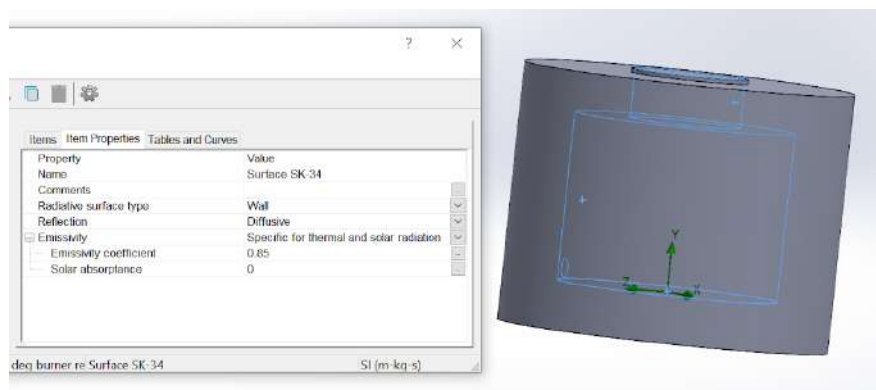


**Gambar 3.10** *Boundary Condition Dinding (Wall)*

Selain itu, dinding juga berperan sebagai media perpindahan panas antara gas panas dan material refraktori. Oleh karena itu, kondisi termal pada dinding diaktifkan untuk memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi dari fluida ke dinding. Temperatur dinding tidak ditetapkan secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan interaksi termal yang terjadi selama simulasi.

### 3.3.6 Penentuan Properti Material

Properti material fluida dan dinding ditetapkan untuk mendukung perhitungan aliran dan perpindahan panas secara akurat. Gas panas yang mengalir di dalam furnace didefinisikan sebagai fluida kerja dengan sifat termofisik tertentu, seperti densitas, viskositas, dan kapasitas panas, yang disesuaikan dengan kondisi temperatur operasi.



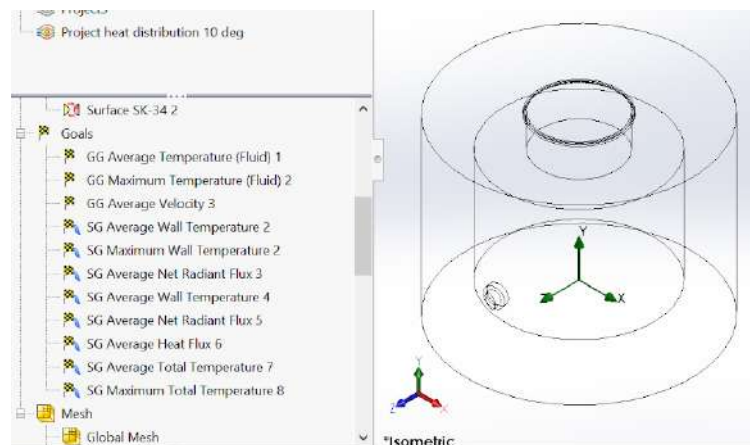
**Gambar 3.11** Penentuan Properti Material

Material dinding *furnace* dimodelkan sebagai refraktori SK-34, dengan properti termal berupa konduktivitas panas yang sesuai dengan karakteristik material tersebut. Penetapan properti ini memungkinkan simulasi menghitung distribusi temperatur dinding dan *heat flux* yang diterima oleh *refractory* secara lebih realistis.

Dengan kombinasi properti material fluida dan dinding yang sesuai, simulasi mampu merepresentasikan kondisi operasi *furnace* secara mendekati keadaan aktual.

### 3.3.7 Penentuan *Goal* Simulasi *Furnace*

Penentuan *goals* pada simulasi CFD dilakukan untuk memperoleh parameter kuantitatif yang merepresentasikan performa aliran dan karakteristik termal *cylinder furnace*. *Goals* berfungsi sebagai indikator numerik yang digunakan untuk memantau kestabilan solusi, mengevaluasi hasil simulasi, serta membandingkan kinerja antar variasi sudut burner yang dianalisis.



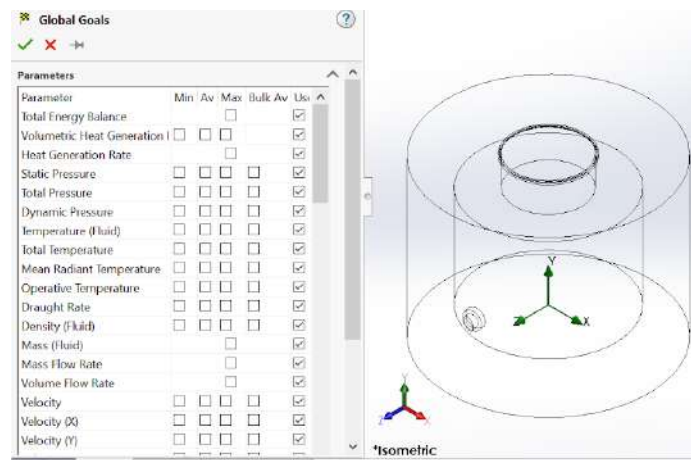
**Gambar 3.12** Penentuan *Goals* Simulasi CFD

Pada penelitian ini, *goals* dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu *Global Goals* (GG) dan *Surface Goals* (SG). Pembagian ini dilakukan untuk memisahkan parameter yang mewakili kondisi rata-rata atau ekstrem pada domain fluida secara keseluruhan dan parameter yang secara khusus berkaitan dengan

perilaku termal pada permukaan dinding *furnace*.

### 3.3.8 Global Goals (GG)

*Global Goals* digunakan untuk mengevaluasi karakteristik aliran dan temperatur gas panas pada seluruh domain fluida di dalam *furnace*. Parameter ini memberikan gambaran umum mengenai kondisi termal dan dinamika aliran yang terjadi di dalam ruang bakar.



**Gambar 3.13** Penentuan *Global Goals* Simulasi CFD

*Global goals* yang ditetapkan pada simulasi ini meliputi:

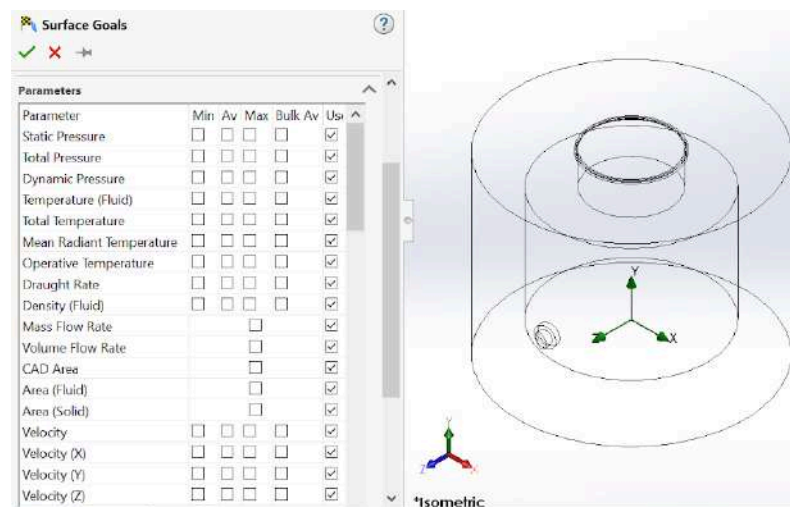
1. GG *Average Temperature (Fluid)* digunakan untuk memperoleh nilai temperatur rata-rata gas panas di seluruh domain fluida. Parameter ini menjadi indikator tingkat pemerataan panas di dalam *furnace* dan digunakan untuk membandingkan efektivitas distribusi panas antar konfigurasi sudut *burner*
2. GG *Maximum Temperature (Fluid)* berfungsi untuk memantau temperatur maksimum gas panas yang terjadi di dalam domain fluida. Nilai ini penting untuk mengidentifikasi potensi terbentuknya temperatur ekstrem yang dapat memicu hotspot atau kondisi operasi yang tidak aman.
3. GG *Average Velocity* digunakan untuk mengetahui kecepatan rata-rata aliran gas panas di dalam *furnace*. Parameter ini berkaitan erat dengan kualitas pencampuran fluida dan pembentukan aliran swirl, yang

berpengaruh langsung terhadap distribusi temperatur dan stabilitas aliran.

*Global goals* tersebut digunakan sebagai acuan untuk memastikan bahwa solusi simulasi telah mencapai kondisi stabil serta untuk melakukan evaluasi kuantitatif terhadap kinerja aliran gas panas di dalam *furnace*.

### 3.3.9 *Surface Goals* (SG)

*Surface Goals* ditetapkan untuk mengevaluasi kondisi termal pada permukaan dinding *furnace* yang terbuat dari material refraktori SK-34. Parameter ini sangat penting karena berkaitan langsung dengan keamanan termal dan umur pakai material dinding.



**Gambar 3.14** Penentuan *Surface Goals* (SG) Simulasi CFD

*Surface goals* yang digunakan dalam simulasi ini meliputi:

1. SG *Average Wall Temperature* digunakan untuk memperoleh nilai temperatur rata-rata pada permukaan dinding *furnace*. Nilai ini memberikan gambaran umum mengenai beban termal yang diterima oleh *refractory* selama operasi *furnace*.
2. SG *Maximum Wall Temperature* digunakan untuk memantau temperatur maksimum pada dinding *furnace*. Parameter ini sangat penting untuk memastikan bahwa temperatur dinding tidak melampaui batas aman material refraktori SK-34, yang berada pada kisaran temperatur operasi maksimum yang direkomendasikan.

3. *SG Average Heat Flux* merepresentasikan nilai rata-rata *heat flux* yang diterima oleh dinding *furnace* akibat perpindahan panas dari gas panas. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi intensitas beban panas dan potensi terjadinya degradasi material akibat paparan panas yang berlebihan.
4. *SG Average Net Radiant Flux* digunakan untuk mengevaluasi kontribusi perpindahan panas radiasi dari gas panas menuju dinding *furnace*. Parameter ini menjadi penting mengingat temperatur operasi *furnace* yang tinggi menyebabkan mekanisme radiasi memiliki pengaruh signifikan terhadap kondisi termal dinding.
5. *SG Average Total Temperature* dan *SG Maximum Total Temperature* digunakan untuk mengevaluasi kondisi temperatur total pada permukaan dinding, baik secara rata-rata maupun maksimum. Parameter ini membantu dalam menilai keseragaman distribusi temperatur serta mengidentifikasi potensi konsentrasi panas lokal pada dinding *furnace*.

### 3.3.10 Penentuan *Mesh* (*Meshing*)

Proses *meshing* merupakan tahapan penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) karena berpengaruh langsung terhadap ketelitian hasil perhitungan numerik. *Mesh* digunakan untuk mendiskretisasi domain komputasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga persamaan konservasi massa, momentum, dan energi dapat diselesaikan secara numerik.



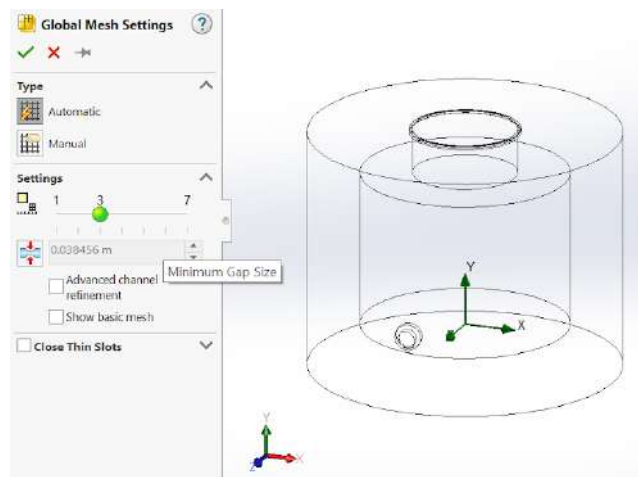
**Gambar 3.15** Penentuan *Mesh* (*Meshing*)

Pada penelitian ini, strategi *meshing* dilakukan dengan mengkombinasikan *global mesh* dan *local mesh* untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi.



### 3.3.11 Global Mesh

*Global mesh* diterapkan pada seluruh domain fluida di dalam *cylinder furnace*. *Mesh* ini berfungsi sebagai dasar diskretisasi yang membagi volume komputasi menjadi elemen-elemen dengan ukuran yang relatif seragam. Pemilihan ukuran elemen pada *global mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi geometri *furnace* dan kompleksitas aliran secara keseluruhan.

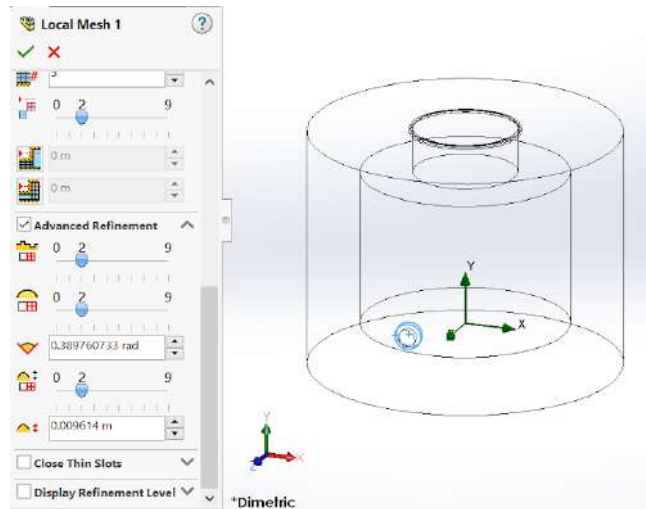


**Gambar 3.16** Penentuan *Global Mesh* Simulasi CFD

Penggunaan *global mesh* memungkinkan simulasi menangkap karakteristik umum aliran gas panas, seperti pola aliran utama, distribusi kecepatan, dan kecenderungan pembentukan swirl di dalam ruang bakar. Ukuran elemen global dipilih agar tidak terlalu kasar sehingga mengurangi akurasi, namun juga tidak terlalu halus agar waktu komputasi tetap efisien.

### 3.3.12 Local Mesh 1

*Local Mesh 1* diterapkan pada area-area tertentu yang memiliki gradien aliran dan temperatur yang tinggi, seperti di sekitar inlet *burner*. Area ini merupakan zona kritis karena aliran gas panas masuk dengan kecepatan dan temperatur yang relatif tinggi serta berperan penting dalam pembentukan aliran swirl.

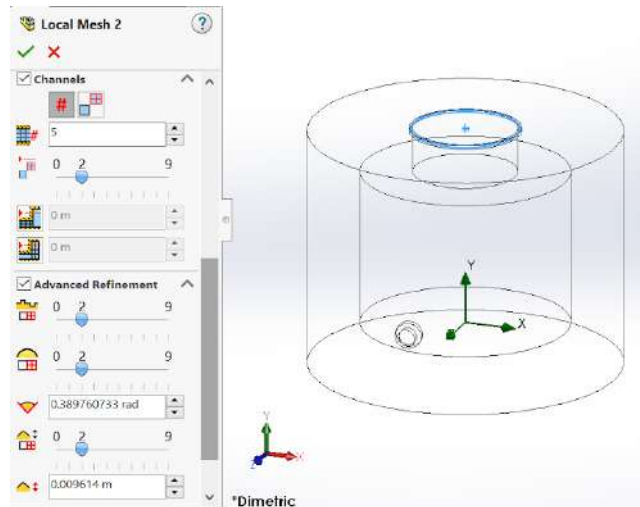


**Gambar 3.17** Penentuan *Local Mesh 1* Simulasi CFD

Dengan menerapkan *local mesh* yang lebih halus pada area inlet, simulasi dapat menangkap perubahan kecepatan dan arah aliran secara lebih detail. Hal ini penting untuk memastikan bahwa fenomena pencampuran awal gas panas dan pembentukan pola aliran spiral dapat direpresentasikan secara akurat. *Refinement* lokal ini juga membantu meningkatkan ketelitian hasil pada kontur kecepatan dan *streamline* yang dianalisis pada subbab hasil simulasi aliran fluida.

### 3.3.13 *Local Mesh 2*

*Local Mesh 2* diterapkan pada area yang berdekatan dengan dinding *furnace*, khususnya pada permukaan dinding refraktori. Area ini memiliki peran penting dalam analisis perpindahan panas karena melibatkan interaksi langsung antara gas panas dan dinding *furnace*.

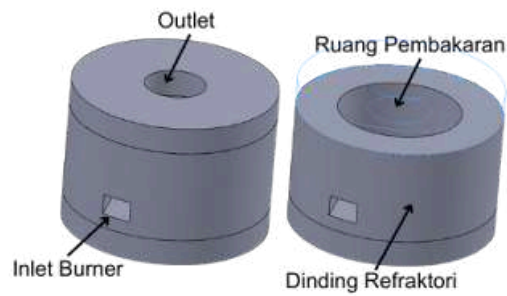


**Gambar 3.18** Penentuan *Local Mesh 2* Simulasi CFD

Penerapan *mesh* yang lebih halus di dekat dinding bertujuan untuk meningkatkan akurasi perhitungan gradien temperatur dan *heat flux*. Dengan *mesh* yang diperhalus pada zona ini, distribusi temperatur dinding dan beban termal yang diterima oleh material refraktori dapat dihitung dengan lebih representatif. Hal ini mendukung analisis keamanan termal dinding *furnace* yang dibahas pada subbab hasil simulasi temperatur dan *heat flux*.

### 3.4 Desain

Desain geometri dibuat menggunakan perangkat lunak *Finite Element Analysis* berdasarkan data dimensi asli tungku serta informasi tambahan dari literatur teknis. Model ruang bakar meliputi Ruang pembakaran utama, *Inlet burner*, *Outlet* gas buang, yang disesuaikan dengan jalur aliran panas, serta Dinding refraktori, dengan ketebalan berdasarkan spesifikasi material tahan api. Pada tahap ini dilakukan penyederhanaan beberapa komponen minor untuk mempercepat proses mesh dan simulasi tanpa mengurangi akurasi perilaku aliran gas panas.



**Gambar 3.19** Desain Tungku Peleburan Logam (*Furnace*)

### 3.5 Sumber Daya

Pelaksanaan penelitian ini membutuhkan berbagai sumber daya yang mencakup tenaga kerja, material teknik, perangkat lunak, perangkat keras, dan komponen pendukung lainnya. Seluruh sumber daya disusun untuk memastikan bahwa proses pemodelan, simulasi, dan analisis dapat dilakukan secara efektif dan memenuhi standar akademik.

#### 3.5.1 Sumber Daya Manusia

Penelitian ini melibatkan tim pelaksana dengan peran dan keahlian sebagai berikut:

1. Peneliti Utama / Mahasiswa : Bertanggung jawab terhadap seluruh rangkaian penelitian, mulai dari pengumpulan data, pembuatan model geometri, pelaksanaan simulasi CFD, analisis hasil, hingga penyusunan laporan akhir dan Menguasai aplikasi pemodelan CAD dan dasar-dasar *Computational Fluid Dynamics*.
2. Dosen Pembimbing : Memberikan arahan teknis, akademik, serta memastikan setiap tahapan penelitian sesuai kaidah metodologi ilmiah dan Meninjau hasil simulasi, validitas data, serta memberikan evaluasi secara berkala.

Dengan kolaborasi peran tersebut, penelitian dapat berjalan lebih terkontrol dan terarah.

### 3.5.2 Material dan Bahan

Karena penelitian ini lebih berfokus pada simulasi numerik, kebutuhan material fisik relatif minimal. Namun demikian, beberapa bahan pendukung tetap diperlukan sebagai referensi teknis maupun kebutuhan dokumentasi:

1. Data spesifikasi tungku peleburan logam, seperti Dimensi ruang bakar, Ketebalan dinding, Spesifikasi *burner*, dan Jenis refraktori (misalnya *air setting mortar* TS-140 atau *refractory brick* SK-34)
2. Literatur teknis dan jurnal ilmiah terkait CFD, tungku peleburan, perpindahan panas, dan desain termal.
3. Dokumen pendukung, misalnya katalog material *refractory*, tabel sifat termal, serta datasheet *burner*.

Material fisik seperti batu bata tahan api atau *burner* asli tidak digunakan secara langsung, namun spesifikasinya menjadi dasar pemodelan.

### 3.5.3 Alat dan Perangkat

Penelitian ini memerlukan perangkat lunak dan perangkat keras untuk pemodelan dan simulasi, yaitu:

1. Perangkat Lunak (*Software*) :
  - Finite Element Analysis Digunakan untuk membuat model 3D tungku dan menjalankan simulasi menggunakan modul *Heat distribution simulation* dan Menyediakan fitur analisis aliran fluida, perpindahan panas, serta turbulensi.
  - Microsoft Excel / Spreadsheet Digunakan untuk mengolah data hasil simulasi, membuat grafik, dan menyusun tabel.
  - Reference Manager (Mendeley/Zotero) Untuk pengelolaan sitasi dan daftar pustaka selama penyusunan laporan.
2. Perangkat Keras (*Hardware*)
  - Laptop atau Komputer dengan Spesifikasi Memadai, minimal Prosesor Quad-Core , RAM 16 GB, Storage yang memadai untuk file simulasi dan model 3D
  - Perangkat Penyimpanan Eksternal Untuk backup file penelitian dan hasil

simulasi.

### 3.6 Rencana Jadwal

Adapun rencana jadwal pelaksanaan penelitian pada tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3.1** Rencana Penelitian Tahun 2025

No	Kegiatan	Bulan											
		Oktober				November				Desember			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur												
2	Penyusunan Draft Proposal												
3	Seminar Proposal												
4	Pelaksanaan Penelitian dan Pengumpulan Data												
5	Analisis Hasil Penelitian dan Data												
6	Penyusunan Laporan TA												
7	Sidang Tugas Akhir												

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 4

### HASIL PROYEK

#### 4.1 Gambaran Umum Hasil Simulasi

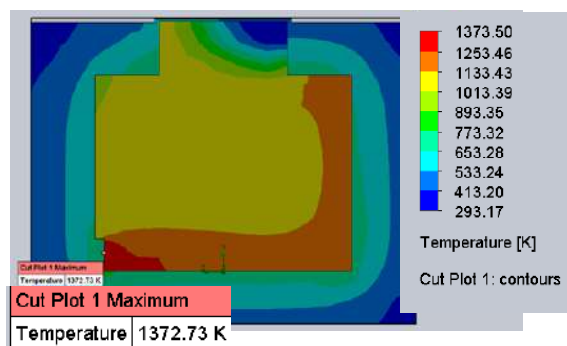
Bab ini menyajikan hasil proyek simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada tungku peleburan silinder dengan variasi sudut *burner*, yaitu  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ , dan  $20^\circ$ . Tujuan utama simulasi adalah mengevaluasi efektivitas sudut *burner* dalam menghasilkan distribusi temperatur yang merata, pola aliran gas panas yang stabil, serta meminimalkan risiko *hotspot* dan beban panas berlebih pada dinding *refractory brick* SK-34 yang direkatkan menggunakan *air setting mortar* TS-140. Evaluasi hasil simulasi dilakukan melalui beberapa parameter utama, meliputi:

1. *Cut plot* distribusi temperatur,
2. *Cut plot* dan *streamline* kecepatan aliran,
3. *Surface plot* temperatur dinding SK-34,
4. *Surface plot heat flux*,
5. Visualisasi temperatur *isosurface* (1073 K dan 1273 K).

Kelima parameter ini digunakan untuk menilai kinerja termal tungku secara komprehensif dan membandingkan kualitas masing-masing konfigurasi sudut *burner*.

#### 4.2 Distribusi Temperatur Gas Panas (*Temperature Cut Plot*)

Hasil *temperature cut plot* pada bidang YZ dan XY menunjukkan perbedaan karakteristik distribusi panas yang signifikan antar variasi sudut *burner*.



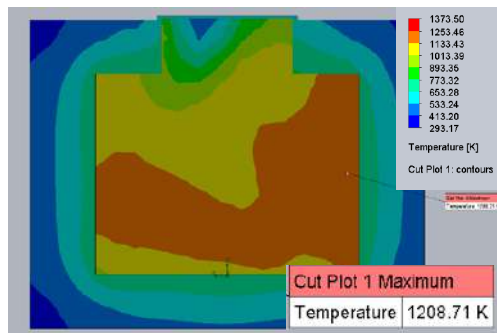


(a)

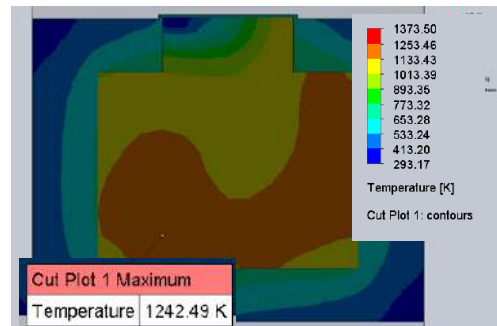
(b)

**Gambar 4.1** Temperatur *cut plot* sudut  $0^\circ$  pada sumbu YZ (a), Temperatur *cut plot* sudut  $0^\circ$  pada sumbu XY (b)

Pada konfigurasi  $0^\circ$ , distribusi temperatur masih menunjukkan kecenderungan jet lurus dari *inlet burner*. Meskipun warna panas menyebar secara aksial, pola penyebaran melingkar belum terbentuk secara optimal. Pada beberapa area dekat dinding, warna temperatur tinggi terlihat mendekati permukaan dinding, yang mengindikasikan potensi *flame impingement* lokal.



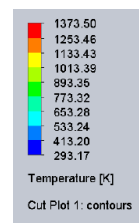
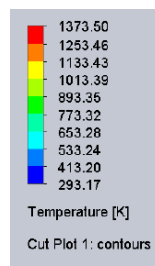
(a)

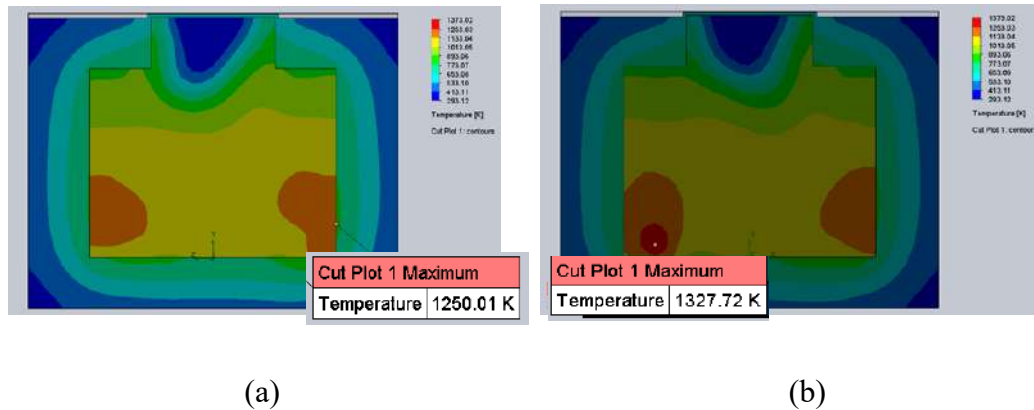


(b)

**Gambar 4.2** Temperatur *cut plot* sudut  $10^\circ$  pada sumbu YZ (a), Temperatur *cut plot* sudut  $10^\circ$  pada sumbu XY (b)

Konfigurasi  $10^\circ$  menunjukkan hasil yang paling optimal. Warna panas menyebar secara melingkar dan simetris, menandakan terbentuknya pola *swirl* yang stabil. Tidak teridentifikasi *hotspot* ekstrem yang menempel pada dinding, dan distribusi temperatur relatif homogen di seluruh volume *furnace*. Kondisi ini sesuai dengan tujuan desain, yaitu menjaga jarak *flame* dari dinding dan meningkatkan pencampuran gas panas.





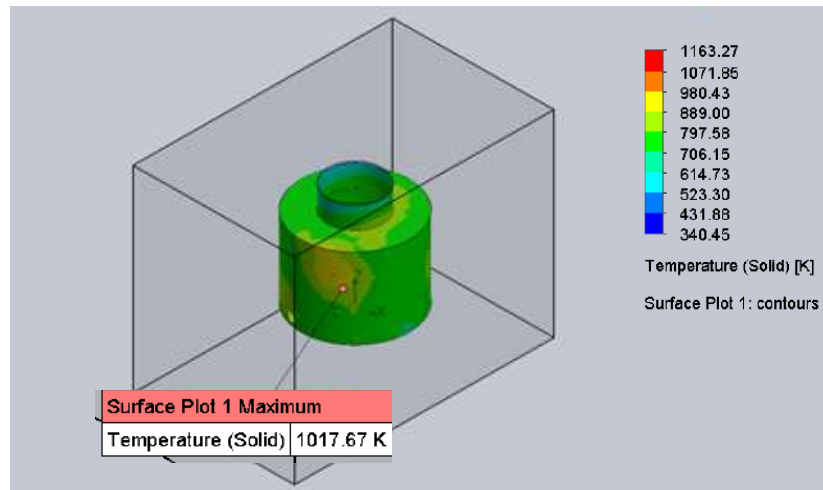
**Gambar 4.3** Temperatur *cut plot* sudut  $20^\circ$  pada sumbu YZ (a), Temperatur *cut plot* sudut  $20^\circ$  pada sumbu XY (b)

Sebaliknya, pada konfigurasi  $20^\circ$ , sudut *burner* yang lebih besar menyebabkan arah *flame* terlalu menyamping. Hal ini terlihat dari warna temperatur tinggi yang cenderung mendekati dinding *furnace*. Kondisi ini berpotensi meningkatkan beban panas lokal pada dinding dan menurunkan kestabilan distribusi temperatur.

#### 4.3 Temperatur Dinding *Refractory Brick* SK-34

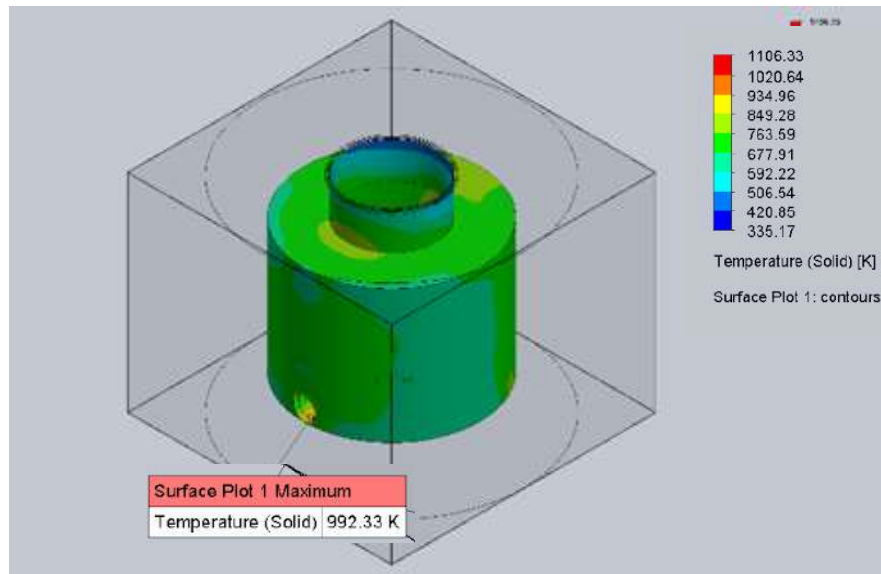
Analisis temperatur dinding *refractory brick* SK-34 merupakan aspek krusial dalam evaluasi kinerja termal tungku peleburan, karena temperatur dinding secara langsung mempengaruhi umur pakai refraktori, stabilitas struktur tungku, serta keselamatan operasi. Temperatur dinding yang terlalu tinggi atau tidak merata dapat memicu tegangan termal berlebih, retak, *spalling*, hingga kegagalan dini material refraktori.

Berdasarkan hasil *surface plot wall temperature*, ketiga variasi sudut burner ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ , dan  $20^\circ$ ) menunjukkan bahwa *refractory brick* SK-34 secara umum masih bekerja dalam rentang temperatur aman, yaitu di bawah  $1300\text{--}1350^\circ\text{C}$ , sesuai dengan batas ketahanan material *fire clay brick* berbasis alumina–silika. Hal ini sejalan dengan laporan Hossain et al. (2020) yang menyatakan bahwa *refractory brick* alumina–silika dengan kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sekitar 35–40% memiliki stabilitas termal yang baik selama temperatur operasi dijaga di bawah batas maksimum desainnya.



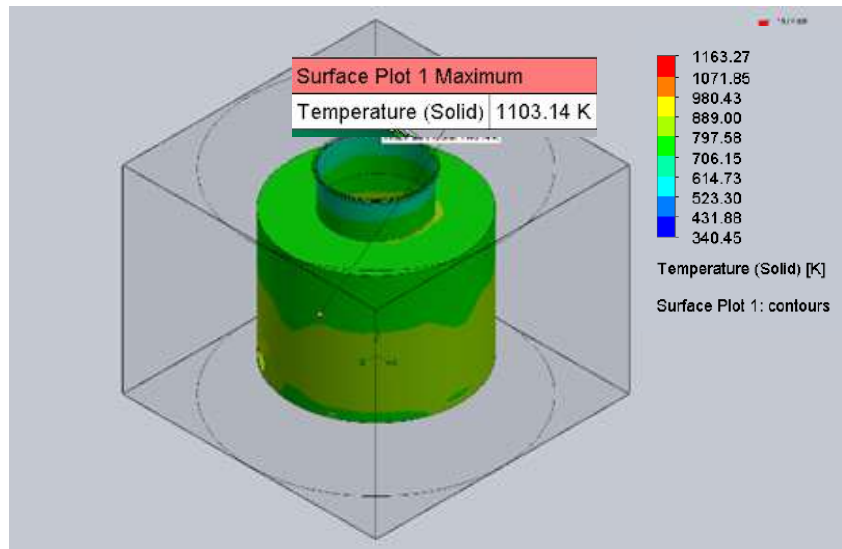
**Gambar 4.4** Temperatur pada *surface plot wall SK-34* pada sudut  $10^\circ$

Konfigurasi  $10^\circ$  menunjukkan performa terbaik dalam analisis temperatur dinding. Pada sudut ini, warna pada *surface plot* relatif seragam di seluruh permukaan dinding, menandakan distribusi panas yang homogen. Tidak teridentifikasi titik merah tajam (*hotspot* lokal) yang menempel pada dinding. Hal ini menunjukkan bahwa pola aliran *swirl* yang terbentuk mampu menjaga jarak *flame* dari dinding serta mendistribusikan panas secara lebih merata di dalam volume *furnace*. Temuan ini sesuai dengan penelitian Rumanto et al. (2020) dan Wira Febrian et al. (2023) yang menyatakan bahwa aliran spiral pada tungku peleburan berperan penting dalam menurunkan temperatur puncak dinding dan meningkatkan homogenitas termal.



**Gambar 4.5** Temperatur pada *surface plot wall SK-34* pada sudut  $0^\circ$

Perbedaan distribusi temperatur dinding terlihat jelas antar konfigurasi sudut *burner*. Pada konfigurasi  $0^\circ$ , meskipun temperatur maksimum masih berada dalam batas aman, *surface plot* menunjukkan adanya zona lokal dengan temperatur lebih tinggi di area tertentu dinding tungku. Kondisi ini berkaitan dengan pola aliran gas panas yang cenderung membentuk jet lurus, sehingga panas terfokus pada jalur tertentu sebelum menyebar. Menurut Gupta dan Krishnamurthy (2019), distribusi panas yang tidak merata pada dinding tungku merupakan salah satu penyebab utama munculnya tegangan termal lokal yang mempercepat degradasi refraktori



**Gambar 4.6** Temperatur pada *surface plot wall* SK-34 pada sudut 20°

pada konfigurasi 20°, meskipun *swirl* terbentuk, sudut *burner* yang terlalu besar menyebabkan arah *flame* dan aliran gas panas cenderung mendekati dinding tungku. Hal ini tercermin dari munculnya area dengan temperatur dinding yang lebih tinggi secara lokal. Menurut Incropera et al. (2017), peningkatan temperatur dinding akibat *flame impingement* tidak hanya meningkatkan konduksi panas ke dalam refraktori, tetapi juga memperbesar kontribusi radiasi termal, yang sangat dominan pada temperatur tinggi. Jika kondisi ini berlangsung dalam jangka panjang, risiko retak termal dan *spalling* pada *refractory brick* SK-34 akan meningkat.

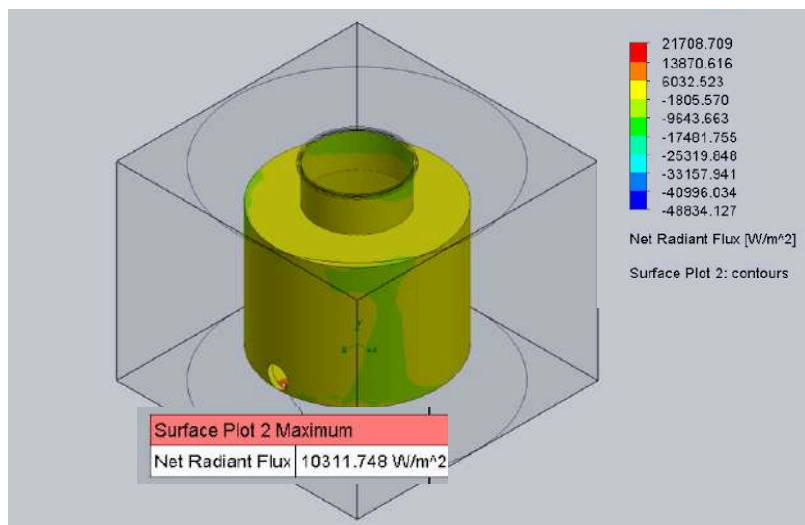
Selain itu, penggunaan air setting mortar TS-140 sebagai material sambungan antar bata turut berkontribusi dalam menjaga kestabilan temperatur dinding. Mortar dengan pemasangan rapat mampu mengurangi kebocoran panas pada sambungan bata dan mencegah konsentrasi panas lokal. Hal ini sejalan dengan temuan Kartikasari dan Nugroho (2022) yang menyatakan bahwa kualitas dan sifat termal mortar tahan api sangat berpengaruh terhadap distribusi temperatur dan umur pakai dinding tungku. Secara keseluruhan, hasil analisis temperatur dinding menunjukkan bahwa konfigurasi sudut burner 10° memberikan kondisi termal paling aman dan stabil bagi *refractory brick* SK-34. Distribusi temperatur yang homogen menurunkan gradien termal pada dinding,

sehingga tegangan termal dapat diminimalkan. Temuan ini menjelaskan bahwa optimasi sudut *burner* tidak hanya berdampak pada performa aliran dan distribusi temperatur gas, tetapi juga secara langsung meningkatkan keandalan dan umur pakai material refraktori tungku.

#### 4.4 Analisis *Heat Flux* pada Dinding Tungku

Analisis *heat flux* pada dinding tungku merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi kinerja termal dan keamanan operasional tungku peleburan. *Heat flux* menggambarkan laju perpindahan panas per satuan luas yang diterima oleh dinding *refractory brick* SK-34, sehingga secara langsung berkaitan dengan risiko terjadinya tegangan termal dan degradasi material dalam jangka panjang.

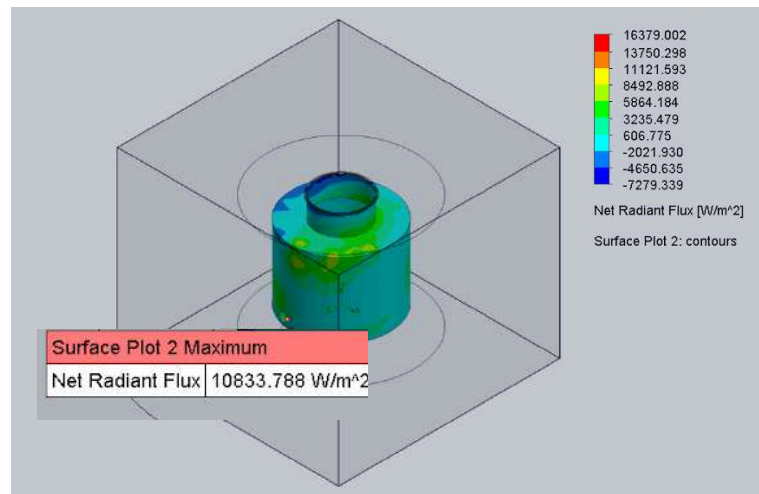
Berdasarkan hasil *surface plot heat flux*, secara umum nilai fluks panas pada dinding tungku berada pada rentang 20–40 kW/m<sup>2</sup>, yang masih tergolong aman untuk material *refractory brick* SK-34. Rentang ini menunjukkan bahwa kombinasi material SK-34 mampu menahan laju perpindahan panas dari gas pembakaran menuju dinding luar dengan efektif.



**Gambar 4.7** *Surface plot-heat flux* sudut 0° pada *cylinder furnace*

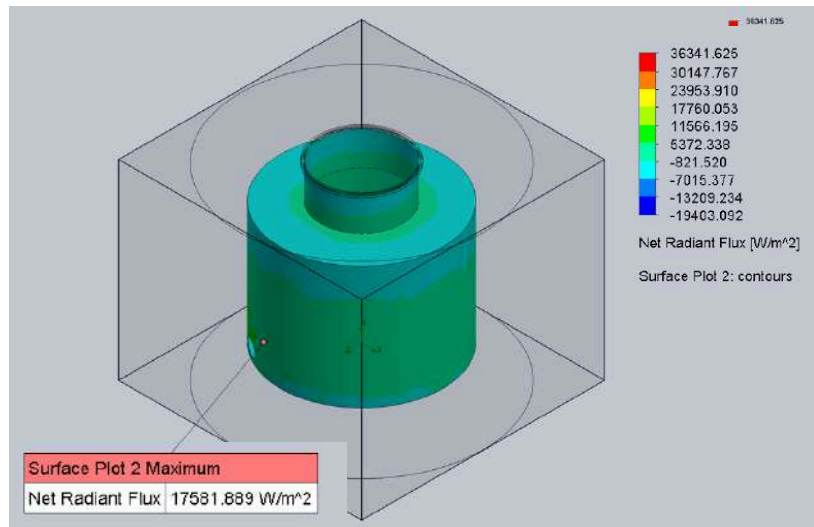
Pada konfigurasi sudut *burner* 0°, distribusi *heat flux* menunjukkan pola yang kurang merata. Nilai *heat flux* sebesar 10311.748 W/m<sup>2</sup>, masih berada dalam batas aman, terdapat beberapa area dengan peningkatan fluks panas lokal. Kondisi

ini berkaitan dengan pola aliran gas panas yang cenderung membentuk jet lurus, sehingga energi panas terfokus pada jalur tertentu sebelum menyebar ke seluruh volume *furnace*. Fokus energi ini meningkatkan *heat flux* pada area dinding yang berdekatan dengan arah jet, yang dalam operasi jangka panjang berpotensi mempercepat keausan material refraktori.



**Gambar 4.8** *Surface plot-heat flux* sudut 10° pada *cylinder furnace*

Konfigurasi 10° menunjukkan performa paling optimal dalam hal distribusi *heat flux*. Pada sudut ini, pola aliran gas panas membentuk spiral yang stabil dan menyebar secara merata di dalam *furnace*. Akibatnya, panas tidak terakumulasi pada satu titik dinding tertentu, melainkan terdistribusi secara homogen. Hal ini tercermin dari *surface plot heat flux* yang relatif seragam tanpa lonjakan lokal signifikan. Kondisi ini sangat menguntungkan karena gradien panas pada dinding menjadi lebih kecil, sehingga tegangan temperatur yang timbul pada *refractory brick* SK-34 dapat berkurang.



**Gambar 4.9** *Surface plot-heat flux sudut 20° pada cylinder furnace*

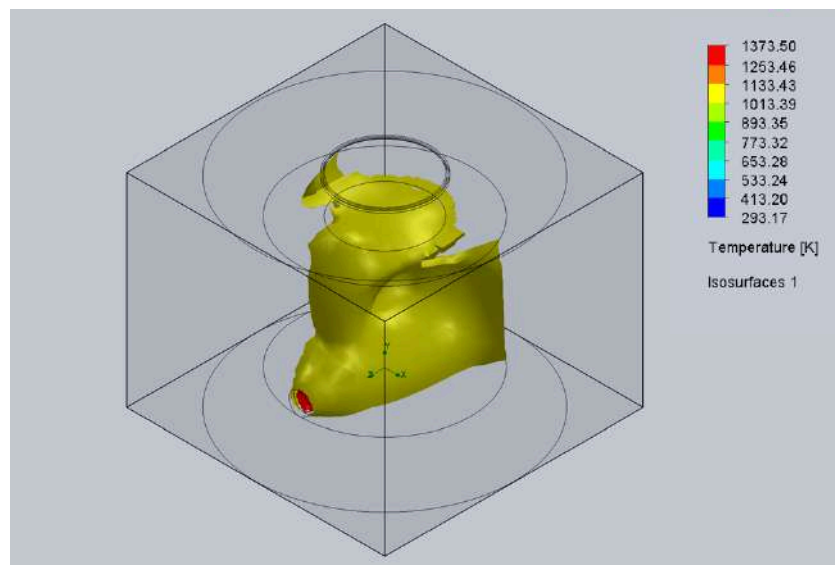
Sebaliknya, pada konfigurasi sudut *burner* 20°, terlihat kecenderungan peningkatan *heat flux* yang lebih jelas. Sudut *burner* yang terlalu besar menyebabkan arah *flame* dan aliran gas panas mendekati dinding *furnace*, sehingga terjadi fenomena *flame impingement*. *Impingement* ini meningkatkan laju perpindahan panas secara konveksi dan radiasi pada area dinding tertentu, yang tercermin dari nilai *heat flux* yang mendekati atau bahkan berpotensi melampaui batas kritis 50 kW/m². Jika kondisi ini terjadi secara terus-menerus, risiko retak termal dan pengelupasan permukaan (*spalling*) pada *refractory brick* SK-34 akan meningkat secara signifikan. Dari sudut pandang desain dan simulasi tungku, hasil analisis ini menjelaskan bahwa *heat flux* bukan hanya dipengaruhi oleh temperatur gas panas, tetapi sangat bergantung pada pola aliran dan jarak *flame* terhadap dinding. Konfigurasi sudut burner 10° mampu mengendalikan kedua aspek tersebut secara optimal, sehingga menghasilkan distribusi beban panas yang aman dan stabil.

#### 4.5 Analisis Volume Gas Panas Efektif ( *Temperature Isosurface* )

Analisis temperatur *isosurface* digunakan untuk mengevaluasi efektivitas pemanfaatan energi panas di dalam volume tungku, bukan hanya berdasarkan nilai temperatur maksimum, tetapi berdasarkan seberapa besar volume ruang bakar yang benar-benar berada pada temperatur kerja efektif. Dalam penelitian ini,

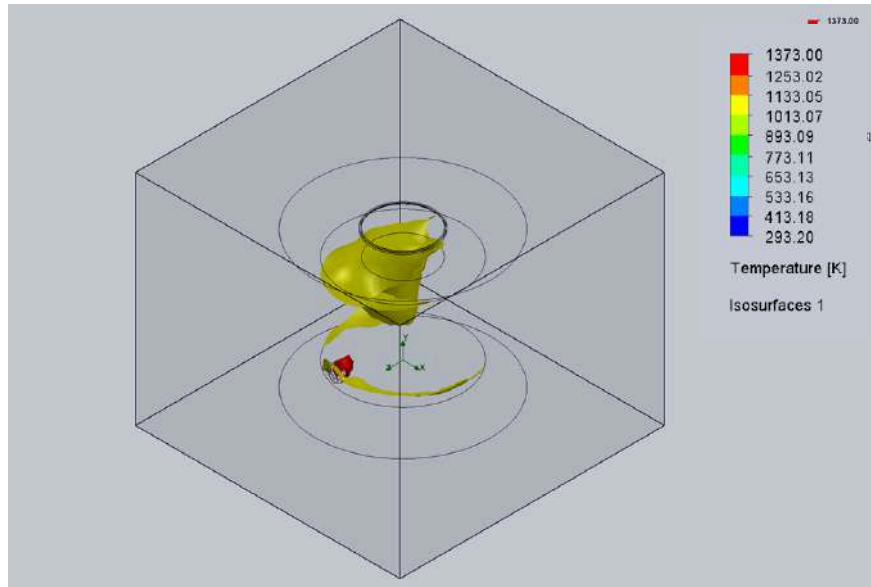


*isosurface* ditampilkan pada temperatur 1073 K ( $\pm 800$  °C) dan 1273 K ( $\pm 1000$  °C), yang merepresentasikan zona gas panas yang relevan untuk proses peleburan dan transfer panas ke material. Penggunaan *isosurface* memberikan keunggulan dibandingkan *cut plot* dua dimensi karena mampu menggambarkan struktur tiga dimensi zona panas, termasuk bentuk, kontinuitas, dan interaksinya dengan dinding tungku. *Furnace* dengan performa termal yang baik diharapkan memiliki volume *isosurface* temperatur tinggi yang besar, menyebar merata, membentuk pola *swirl*, serta tidak menempel langsung pada dinding untuk menghindari *impingement*.



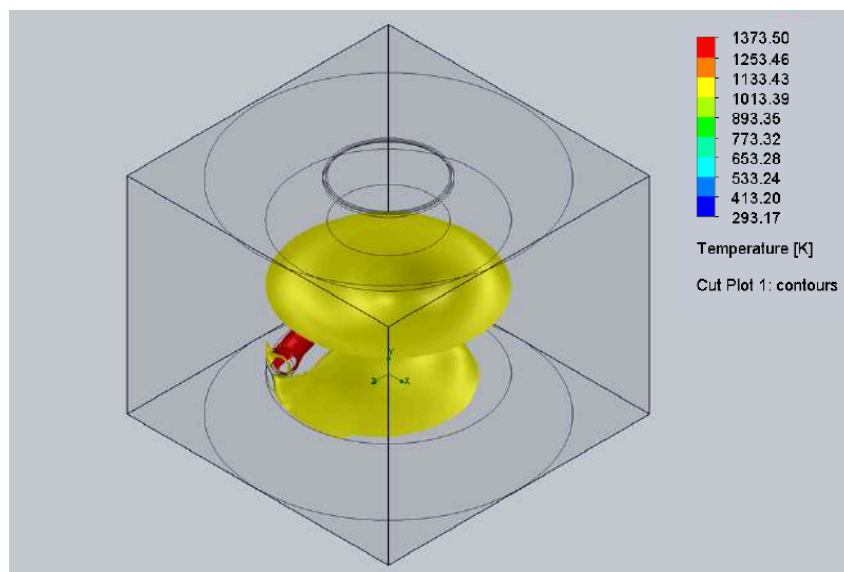
**Gambar 4.10** Temperatur *isosurface* (1273 K & 1073 K) pada sudut 0°

Pada konfigurasi sudut burner 0°, *isosurface* temperatur 1073 K dan 1273 K cenderung membentuk struktur memanjang mengikuti arah jet *burner*. Zona gas panas terkonsentrasi di jalur aliran utama dan tidak menyebar secara optimal ke seluruh volume *furnace*. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun temperatur lokal tinggi dapat tercapai, pemanfaatan energi panas belum efisien karena sebagian besar volume tungku berada pada temperatur yang lebih rendah. Selain itu, pola jet lurus meningkatkan risiko panas terfokus pada area tertentu, yang dapat berdampak pada ketidakseragaman proses peleburan.



**Gambar 4.11** Temperatur *isosurface* (1273 K & 1073 K) pada sudut 10°

Konfigurasi 10° menunjukkan hasil paling optimal dalam analisis *isosurface*. Pada sudut ini, *isosurface* 1073 K terlihat mengisi lebih dari 60–70% volume *furnace*, dengan bentuk spiral atau *swirl* yang stabil dan menyeluruh. *Isosurface* tidak terkonsentrasi pada satu jalur, melainkan menyebar secara radial dan aksial, menandakan pencampuran gas panas yang efektif. *Isosurface* 1273 K juga terdistribusi lebih merata di sekitar inti *furnace* tanpa menempel keras pada dinding, sehingga panas dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk proses peleburan sekaligus menjaga temperatur dinding refraktori.



**Gambar 4.12** Temperatur *isosurface* (1273 K & 1073 K) pada sudut 20°

pada konfigurasi sudut burner 20°, meskipun terbentuk pola *swirl*, *isosurface* temperatur tinggi menunjukkan kecenderungan bergeser mendekati dinding *furnace*. Hal ini disebabkan oleh sudut injeksi *burner* yang terlalu besar, sehingga arah *flame* dan momentum aliran gas panas lebih dominan menuju dinding. Akibatnya, sebagian volume gas panas efektif berkurang, sementara risiko *impingement* dan beban panas lokal pada dinding meningkat. Kondisi ini tidak menguntungkan baik dari sisi efisiensi energi maupun penggunaan jangka panjang material refraktori.

#### 4.6 Evaluasi Efektivitas dan Inovasi Proyek

Berdasarkan keseluruhan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi sudut *burner* 10° merupakan desain paling efektif dalam menghasilkan distribusi temperatur yang merata, pola aliran spiral yang stabil, serta beban panas dinding yang aman. Nilai inovasi proyek ini terletak pada pendekatan evaluasi menyeluruh berbasis CFD yang mengintegrasikan:

1. Analisis temperatur gas.
2. Pola aliran dan *swirl*.
3. Beban termal dinding.
4. Volume gas panas efektif.

Pendekatan ini memberikan dasar teknis yang kuat untuk optimasi desain tungku peleburan silinder tanpa memerlukan pengujian eksperimental berskala besar.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang telah dilakukan pada tungku peleburan silinder dengan variasi sudut burner 0°, 10°, dan 20°, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Distribusi temperatur di dalam tungku sangat dipengaruhi oleh sudut burner. Konfigurasi sudut burner 10° menghasilkan sebaran temperatur gas panas yang paling merata dengan pola melingkar (*swirl*) yang stabil, sedangkan sudut 0° cenderung membentuk jet lurus dan sudut 20° meningkatkan kecenderungan *flame* mendekati dinding.
2. Temperatur dinding *refractory brick* SK-34 berada dalam batas aman operasi, khususnya pada konfigurasi 10°, dengan temperatur maksimum dinding tetap berada di bawah batas kritis material ( $\pm 1300\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dan distribusi temperatur yang relatif homogen.
3. Distribusi *heat flux* pada dinding tungku paling merata terjadi pada sudut burner 10°, dengan nilai dominan berada pada rentang aman 20–40 kW/m<sup>2</sup>. Pada sudut 20° mulai terlihat kecenderungan peningkatan *heat flux* lokal yang berpotensi meningkatkan risiko retak termal pada material refraktori.
4. Visualisasi temperature *isosurface* menunjukkan bahwa konfigurasi 10° mampu menghasilkan volume gas panas efektif terbesar, dengan isosurface 800 °C mengisi lebih dari 60–70% volume *furnace* dan membentuk pola spiral (*swirl*) yang tidak menempel langsung ke dinding.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan proyek ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menggunakan konfigurasi sudut burner sekitar 10° pada desain tungku peleburan silinder guna memperoleh distribusi temperatur yang lebih merata dan umur pakai dinding refraktori yang lebih panjang.

2. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan simulasi ke kondisi transient, khususnya untuk menganalisis fase pemanasan awal (*start-up*) dan pendinginan, yang berpotensi menimbulkan gradien termal tinggi.
3. Perlu dilakukan variasi parameter operasi lain, seperti laju alir gas, temperatur *inlet*, dan posisi *burner*, untuk memperoleh konfigurasi desain yang lebih optimal secara menyeluruh.
4. Validasi eksperimental sangat disarankan apabila data lapangan tersedia, guna meningkatkan tingkat kepercayaan hasil simulasi CFD terhadap kondisi operasi nyata.
5. Studi lanjutan dapat mencakup analisis tegangan termal dan umur pakai material refraktori, sehingga evaluasi kinerja tungku tidak hanya terbatas pada aspek termal, tetapi juga aspek mekanik.
6. Penggunaan material refraktori alternatif atau kombinasi lapisan isolasi tambahan dapat dievaluasi untuk meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan kehilangan panas pada dinding tungku.

## DAFTAR PUSTAKA

Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. New York: McGraw-Hill.

Gupta, R., & Krishnamurthy, N. (2019). *Refractory Materials: Properties, Production, and Applications*. London: Elsevier.

Harris, P., & Rimkute, I. (2020). Temperature-dependent thermal conductivity modeling of refractory materials at high temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(4), 2451–2460.

Hossain, M. A., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2020). Thermal behavior and performance analysis of alumina–silica refractory bricks in high temperature furnaces. *Ceramics International*, 46(6), 7658–7666.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Kartikasari, D., & Nugroho, A. (2022). Karakteristik mekanik dan termal mortar tahan api tipe air setting pada aplikasi tungku industri. *Jurnal Teknik Material dan Metalurgi*, 14(2), 85–92.

Rahim, A., & Riupassa, M. (2017). Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) distribusi temperatur pada destilator tenaga surya menggunakan ANSYS 14.5. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(2), 45–52.

Rumanto, I., Pratama, R., & Saputra, D. (2020). Analisis Computational Fluid Dynamics (CFD) penyebaran panas pada dapur peleburan aluminium. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(1), 23–31.

Sarifudin, A., & Effendi, R. (2025). Optimisasi perpindahan panas dan efisiensi sistem ekstraksi minyak kemiri melalui pendekatan eksperimental dan simulasi CFD. *Jurnal Energi dan Termofluida*, 3(1), 10–19.

Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Wira Febrian, A., Putra, R., & Hidayat, M. (2023). Analisis Computational Fluid Dynamics (CFD) penyebaran panas pada dapur peleburan aluminium. *Jurnal*

*Ilmiah Teknik Mesin*, 7(3), 101–109.

Gupta, R., & Krishnamurthy, N. (2019). *Refractory Materials: Properties, Production, and Applications*. Elsevier.

Hossain, M. A., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2020). Thermal behavior and performance analysis of alumina–silica refractory bricks in high temperature furnaces. *Ceramics International*, 46(6), 7658–7666.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.

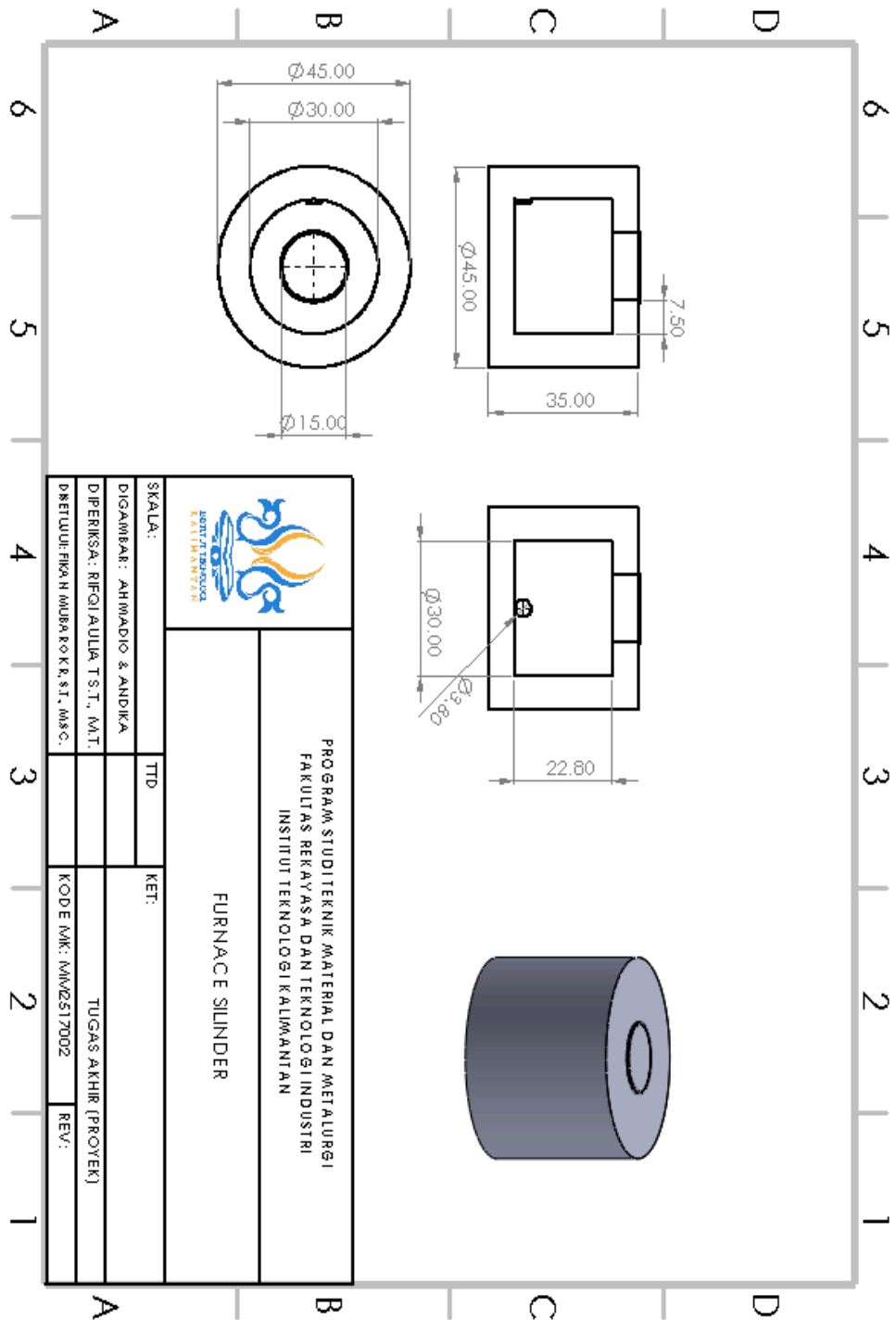
Rumanto, I., Pratama, R., & Saputra, D. (2020). Analisis CFD penyebaran panas pada dapur peleburan aluminium. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(1), 23–31.

Wira Febrian, A., Putra, R., & Hidayat, M. (2023). Analisis CFD penyebaran panas pada dapur peleburan aluminium. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 7(3), 101–109.

Kartikasari, D., & Nugroho, A. (2022). Karakteristik mekanik dan termal mortar tahan api tipe air setting. *Jurnal Teknik Material dan Metalurgi*, 14(2), 85–92.

## LAMPIRAN A

### Gambar Teknik *furnace*





## **LAMPIRAN B**

### **Dokumentasi Furnace yang Digunakan dalam Penelitian**



*Detail Burner Furnace*



*Furnace silinder yang digunakan sebagai objek penelitian*



*Refraktori SK-34 yang digunakan untuk dinding Furnace*

## RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama Ahmadio Maulana Supriadi lahir di Kota Padang pada tanggal 16 Juni 2000. Penulis merupakan anak ke dua dari empat bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di MIN Gunung Pangilun, Padang, kemudian melanjutkan jenjang pendidikan menengah pertama di MTsN Model Padang, dan kemudian menempuh pendidikan menengah atas di MAN 2 Padang. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi Strata Satu (S1) sarjana di Institut Teknologi Kalimantan pada Program Studi Teknik Material dan Metalurgi sejak tahun 2018. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa di lingkup program studi dengan menjadi staff magang keprofesian pada tahun 2019. Penulis saat ini telah menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD) UNTUK MEMODELKAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA TUNGKU PELEBURAN LOGAM *REFRACTORY BRICK* SK-34 DAN *AIR SETTING MORTAR* TS-140)” dibawah bimbingan Bapak Fikan Mubarak Rohimsyah, S.T., M.Sc. dan Bapak Rifqi Aulia Tanjung, S.T., M.T.

