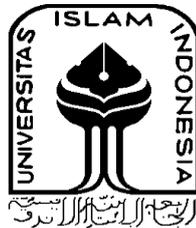


**ANALISIS PERPINDAHAN KALOR UNTUK OPTIMASI  
DESAIN ALAT PENGERING BIJI KAKAO TIPE *TRAY DRYER***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



**Disusun Oleh :**

**Nama : Muhammad Ghifari Zaka Haikal**

**No. Mahasiswa : 19525119**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
YOGYAKARTA**

**2023**

**LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING**

**ANALISIS PERPINDAHAN KALOR UNTUK OPTIMASI  
DESAIN ALAT PENGERING BIJI KAKAO TIPE *TRAY DRYER***

**TUGAS AKHIR**

**Disusun Oleh :**

**Nama : Muhammad Ghifari Zaka Haikal**

**No. Mahasiswa : 19525119**

Yogyakarta, 15 September 2023

Pembimbing I,



Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D.

**LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI**

**ANALISIS PERPINDAHAN KALOR UNTUK OPTIMASI  
DESAIN ALAT PENDINGIN BIJI KAKAO TIPE *TRAY DRYER***

**TUGAS AKHIR**

**Disusun Oleh :**

**Nama : Muhammad Ghifari Zaka Halkal**

**No. Mahasiswa : 19525119**

**Tim Penguji**

Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D.

Ketua

  
Tanggal : 29-09-2023

Arif Budi Wicaksono, Ir., S.T., M.Eng., IPP

Anggota I

  
Tanggal : 27-09-2023

Donny Suryawan, Ir., S.T., M.Eng., IPP

Anggota II

  
Tanggal : 27-09-2023

Mengetahui

Dekan Jurusan Teknik Mesin



Dr. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

## PERNYATAAN KEASLIAN

Demi Allah Yang Maha Segalanya, dengan ini saya menyatakan bahwa karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang telah saya cantumkan sumbernya sebagai referensi. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pengakuan saya tidak benar serta melanggar peraturan yang sah dalam hak kekayaan intelektual maka saya bersedia mengikuti hukuman maupun sanksi apapun sesuai hukum yang diberlakukan Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 27 September 2023



Muhammad Ghifari Zaka Haikal

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan nikmat berupa ilmu pengetahuan, kesehatan, kesempatan, serta doa dan dukungan yang diberikan orang-orang tercinta sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

Orang tua, Adik, dan keluarga yang selalu senantiasa memberikan doa dan dukungan kepada penulis, sehingga terciptalah dan terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing, penguji, dan dosen pengajar. Selain itu juga seluruh dosen dan staf program studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah membimbing dan membagikan ilmunya kepada penulis secara ikhlas.

Rekan-rekan dari jurusan Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.

Dan semua orang-orang yang ada di lingkungan kehidupan penulis yang selalu memberi dukungan yaitu, Annisa, Teman-Teman PPA, Teman-Teman Balakosa, Teman-Teman SD, Teman-Teman SMP, Teman-Teman SMA, Teman-Teman Zepia Kost, Teman-Teman Ulil Albab Students Center Electric Vehicle, dan Teman-Teman KKN Padepokan Kocak 264.

Besar harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat berguna serta bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang yang sesuai dengan topik penulis pada masa yang akan mendatang kelak.

## **HALAMAN MOTTO**

*“Stay Hungry, Stay Foolish.”*

(Steve Jobs)

## KATA PENGANTAR

### بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Segala puja dan puji syukur dipanjatkan kepada kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkah, rahmat, karunia, dan ridhoNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir (TA) dengan judul “Analisis Perpindahan Kalor untuk Optimasi Desain Alat Pengering Biji Kakao Tipe *Tray Dryer*” dengan lancar. Shalawat serta salam tidak lupa penulis haturkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman gelap gulita menjadi zaman terang benderang.

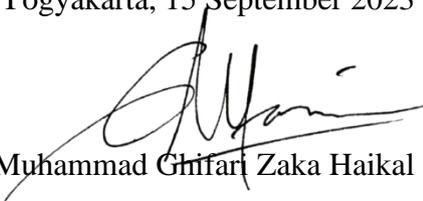
Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari banyak pihak yang memberikan dukungan dan bantuan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, sudah sepantasnya penulis dengan penuh hormat mengucapkan terimakasih dan mendoakan semoga Allah SWT memberikan balasan terbaik kepada:

1. Bapak dan Ibu selaku orang tua penulis dan juga Faid sebagai saudara kandung, yang selalu mendukung dan mendoakan penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo., M.T., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan bimbingan dan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis selama pelaksanaan Tugas Akhir dan selama penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staff program studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.

6. Dan semua orang-orang yang ada di lingkungan kehidupan penulis yang selalu memberi dukungan yaitu, Annisa, Teman-Teman PPA, Teman-Teman Balakosa, Teman-Teman SD, Teman-Teman SMP, Teman-Teman SMA, Teman-Teman Zepia Kost, Teman-Teman Ulil Albab Students Center Electric Vehicle, Teman-Teman KKN Padepokan Kocak 264, Teman-Teman Teknik Mesin 2019, dan semua yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna dan tidak ada yang terlepas dari kesalahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Saran dan kritik yang sifatnya membangun sangat diharapkan oleh penulis sebagai bahan pembelajaran penulis untuk kedepannya. Penulis juga memohon maaf atas kesalahan yang dilakukan penulis dalam menyusun laporan ini. Akhir kata, penulis berharap semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Semoga Allah SWT. senantiasa melimpahkan rahmat dan ridha-Nya kepada kita semua.

Yogyakarta, 15 September 2023



Muhammad Ghifari Zaka Haikal

## ABSTRAK

Alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* merupakan pemecahan masalah dalam mengatasi pengeringan secara konvensional yang selama ini menggunakan panas dari matahari. Alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini diharapkan memudahkan petani kakao dalam mengeringkan biji kakao karena menjadi lebih cepat dan tidak bergantung dengan kondisi cuaca. Dalam mengetahui apakah alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini memiliki kemampuan yang sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao, perlu dilakukan analisis terhadap alat pengering ini. Maka dari itu, penelitian ini akan membahas analisis perpindahan kalor pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasilnya pada kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dalam waktu 10 menit dimana sudah berada pada kondisi *steady-state* temperatur belum sesuai dengan karakteristik dari pengeringan biji kakao. Temperatur dapat dinaikkan dengan cara menurunkan kecepatan aliran udaranya atau menaikkan nilai kalornya melalui bukaan katup. Namun, dengan desain yang sudah di optimasi pada bagian *heat wall* dan *partition wall* dengan menggunakan kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup temperatur dapat meningkat hingga 37,00%. Sehingga dengan menggunakan optimasi desain selain dapat mencapai karakteristik pengeringan biji kakao dapat juga menurunkan penggunaan energi.

Kata Kunci: Alat Pengering Biji Kakao, Perpindahan Kalor, CFD, Temperatur, Optimasi Desain.

## **ABSTRACT**

*The tray dryer type cocoa bean dryer is a solution to overcome conventional drying method that rely on solar heat. This tray dryer type cocoa bean dryer is expected to make it easier for cocoa farmers to dry cocoa beans because it is faster and does not depend on weather conditions. In order to find out whether this tray dryer type cocoa bean dryer has capabilities that match the characteristics of drying cocoa beans, it is necessary to analyze this dryer. Therefore, this research will discuss the analysis of heat transfer in a tray dryer type cocoa bean dryer using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The result is that at a velocity of 25.91 m/s, opening 1/2 of the valve in 10 minutes, which is already at steady-state conditions, the temperature is not in accordance with the characteristics of drying cocoa beans. The temperature can be increased by reducing the airflow velocity or increasing the heating value by opening the valve. However, with an optimized design of the heat wall and partition wall at a velocity of 25.91 m/s with a 1/2 valve opening, the temperature can increase by up to 37.00%. So by using optimized design, apart from being able to achieve drying characteristics of cocoa beans, it can also reduce energy consumption.*

*Keywords: Cocoa Bean Dryer, Heat Transfer, CFD, Temperature, Design Optimization.*

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing .....	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji .....	iii
Pernyataan Keaslian .....	iv
Halaman Persembahan .....	v
Halaman Motto .....	vi
Kata Pengantar .....	vii
Abstrak .....	ix
<i>Abstract</i> .....	x
Daftar Isi .....	xi
Daftar Tabel .....	xiii
Daftar Gambar .....	xiv
Daftar Notasi .....	xx
Bab 1 Pendahuluan .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan .....	3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka .....	5
2.1 Kajian Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori .....	13
2.2.1 Karakteristik Pengeringan Biji Kakao .....	13
2.2.2 Perpindahan Kalor .....	13
2.2.3 <i>Heat Exchanger</i> .....	16
2.2.4 <i>Computer Aided Design (CAD)</i> .....	18
2.2.5 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> .....	19
Bab 3 Metode Penelitian .....	26
3.1 Alur Penelitian .....	26

3.2	Peralatan dan Bahan.....	28
3.3	Proses Pembuatan Desain 3D Model.....	28
3.3.1	<i>Design for Manufacturing</i> .....	29
3.3.2	<i>Design for Simulation</i> .....	29
3.4	Proses Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	31
3.4.1	Pendefinisian Model.....	31
3.4.2	<i>Pre-processing</i> .....	40
3.4.3	<i>Processing</i> .....	46
3.4.4	<i>Post-processing</i> .....	53
3.5	Proses Pengujian .....	55
3.6	Proses Optimasi Desain .....	57
Bab 4	Hasil dan Pembahasan .....	64
4.1	Hasil Simulasi dan Pengujian Alat Pengering Biji Kakao.....	64
4.1.1	Hasil Pembuatan Desain 3D Model.....	64
4.1.2	Hasil Simulasi CFD.....	65
4.1.3	Hasil Pengujian.....	90
4.2	Hasil Simulasi Optimasi Desain Alat Pengering Biji Kakao.....	92
4.2.1	Hasil Pembuatan Optimasi Desain 3D Model.....	92
4.2.2	Hasil Simulasi CFD Optimasi Desain .....	93
4.3	Analisis dan Pembahasan.....	102
4.3.1	Perbandingan Variasi Kecepatan dan Bukaannya Katup.....	104
4.3.2	Perbandingan Simulasi dan Pengujian .....	105
4.3.3	Perbandingan Optimasi Desain .....	106
Bab 5	Penutup.....	109
5.1	Kesimpulan .....	109
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	110
	Daftar Pustaka .....	111

## DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Alat .....	28
Tabel 3-2	Bahan .....	28
Tabel 3-3	<i>Properties Low Carbon Steel</i> dan Udara.....	32
Tabel 3-4	Sifat Aliran .....	33
Tabel 3-5	Jenis Aliran .....	34
Tabel 3-6	Profil Kecepatan .....	34
Tabel 3-7	Data <i>Inlet</i> .....	36
Tabel 3-8	Data Outlet.....	36
Tabel 3-9	Data Eksperimen Nilai Kalor Gas LPG.....	37
Tabel 3-10	Nilai <i>Heat Flux</i> .....	38
Tabel 3-11	Nilai <i>Heat Transfer Coefficient</i> .....	39
Tabel 3-12	Data <i>Mesh Dependency</i> .....	54
Tabel 3-13	Selisih Data <i>Mesh Dependency</i> .....	54
Tabel 3-14	Perhitungan Optimasi Desain .....	62
Tabel 3-15	Data <i>Mesh Dependency</i> Optimasi Desain .....	62
Tabel 3-16	Selisih Data <i>Mesh Dependency</i> Optimasi Desain .....	63
Tabel 4-1	Koordinat Titik Dimulasikan.....	65
Tabel 4-2	Data Pengujian.....	91

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Alat Pengering Biji Kakao Sistem <i>Hybrid</i> .....	5
Gambar 2-2	Keterangan Alat Pengering Biji Kakao Sistem <i>Hybrid</i> .....	6
Gambar 2-3	Distribusi Temperatur Pengering Biji Kakao Sistem <i>Hybrid</i> .....	6
Gambar 2-4	Alat Pengering Biji Kakao dengan Pemanas Listrik .....	7
Gambar 2-5	Hasil Eksperimen menggunakan Alat Pengering Biji Kakao dengan Pemanas Listrik.....	8
Gambar 2-6	Alat <i>Convection Dry Oven</i> .....	9
Gambar 2-7	Visualisasi Komputasi Kecepatan, Distribusi Temperatur, dan Konsentrasi Kelembaban pada Biji Kakao CCN51.....	9
Gambar 2-8	Hasil Kadar Air dengan Waktu Pengeringan.....	9
Gambar 2-9	Hasil Rasio Kelembaban dengan Waktu Pengeringan menggunakan <i>diffusion approximation model</i> .....	10
Gambar 2-10	Visualisasi Aliran Udara pada <i>Heat Exchanger</i> .....	11
Gambar 2-11	Hasil Simulasi Aliran Udara pada <i>Heat Exchanger</i> .....	11
Gambar 2-12	Visualisasi Aliran Udara pada Saluran Ruang Pengering.....	12
Gambar 2-13	Hasil Simulasi Aliran Udara pada Saluran Ruang Pengering.....	12
Gambar 2-14	Konveksi Alami dan Konveksi Paksa.....	14
Gambar 2-15	<i>Double-pipe Heat Exchanger</i> .....	16
Gambar 2-16	<i>Shell and Tube Heat Exchanger</i> .....	17
Gambar 2-17	<i>Plate Heat Exchanger</i> .....	17
Gambar 2-18	Peran CAD dalam Proses Desain Produk .....	18
Gambar 2-19	Tahapan Pengerjaan CFD .....	19
Gambar 2-20	Proses <i>fully-developed flow</i> .....	22
Gambar 2-21	Klasifikasi <i>Mesh</i> .....	23
Gambar 2-22	<i>Skewness</i> dan <i>Orthogonal Quality</i> .....	24
Gambar 3-1	Alur Penelitian .....	27
Gambar 3-2	Desain <i>Heat Exchanger</i> .....	29
Gambar 3-3	Desain Ruang Pengering.....	29
Gambar 3-4	<i>Heat Wall</i> .....	30

Gambar 3-5	<i>Partition Wall</i> .....	30
Gambar 3-6	Skematik Geometri .....	32
Gambar 3-7	Luas Permukaan <i>Heat Wall</i> Kontak dengan <i>Burner</i> .....	38
Gambar 3-8	Volume <i>Heat Wall</i> .....	39
Gambar 3-9	Luas Permukaan Konveksi <i>Heat Wall</i> .....	39
Gambar 3-10	Pendefinisian Titik Nol Geometri .....	40
Gambar 3-11	<i>Interface Heat Wall</i> dan Fluida.....	41
Gambar 3-12	Pendefinisian <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> .....	41
Gambar 3-13	<i>Mesh Sizing</i> .....	42
Gambar 3-14	<i>Body Sizing</i> .....	42
Gambar 3-15	<i>Face Sizing</i> .....	43
Gambar 3-16	<i>Orthogonal Quality</i> .....	43
Gambar 3-17	<i>Skewness Quality</i> .....	44
Gambar 3-18	<i>Detail Meshing 1</i> .....	44
Gambar 3-19	<i>Detail Meshing 2</i> .....	45
Gambar 3-20	<i>Detail Meshing 3</i> .....	45
Gambar 3-21	<i>Detail Meshing 4</i> .....	45
Gambar 3-22	<i>Detail Meshing 5</i> .....	46
Gambar 3-23	<i>Input Solver</i> .....	46
Gambar 3-24	<i>Input Models</i> .....	47
Gambar 3-25	<i>Input Material Udara</i> .....	48
Gambar 3-26	<i>Input Material Low Carbon Steel</i> .....	48
Gambar 3-27	<i>Input Velocity Inlet</i> .....	49
Gambar 3-28	<i>Input Temperature Inlet</i> .....	49
Gambar 3-29	<i>Input Pressure Outlet</i> .....	50
Gambar 3-30	<i>Input Nilai Heat Flux</i> .....	50
Gambar 3-31	<i>Input Nilai Heat Transfer Coefficient</i> .....	51
Gambar 3-32	<i>Input Fluida</i> .....	51
Gambar 3-33	<i>Input Solution Methods</i> .....	52
Gambar 3-34	<i>Input Initialization</i> .....	53
Gambar 3-35	<i>Input Calculation</i> .....	53
Gambar 3-36	<i>Mesh Dependency</i> .....	55

Gambar 3-37	Instalasi Sensor <i>Thermocouple</i> .....	56
Gambar 3-38	Proses Pengujian .....	56
Gambar 3-39	Optimasi Desain <i>Heat Wall</i> .....	57
Gambar 3-40	Optimasi Desain <i>Partition Wall</i> .....	58
Gambar 3-41	<i>Body Sizing</i> .....	58
Gambar 3-42	<i>Face Sizing</i> .....	59
Gambar 3-43	<i>Orthogonal Quality</i> .....	59
Gambar 3-44	<i>Skewness Quality</i> .....	59
Gambar 3-45	<i>Detail Meshing 1</i> .....	60
Gambar 3-46	<i>Detail Meshing 2</i> .....	60
Gambar 3-47	<i>Detail Meshing 3</i> .....	60
Gambar 3-48	Luas Permukaan Optimasi Desain <i>Heat Wall</i> Kontak dengan <i>Burner</i> .....	61
Gambar 3-49	Volume Optimasi Desain <i>Heat Wall</i> .....	61
Gambar 3-50	Luas Permukaan Optimasi Desain <i>Heat Wall</i> .....	62
Gambar 3-51	<i>Mesh Dependency</i> Optimasi Desain .....	63
Gambar 4-1	Hasil <i>Design for Manufacturing</i> Alat Pengering .....	64
Gambar 4-2	Hasil <i>Design for Simulation</i> Alat Pengering.....	64
Gambar 4-3	Titik yang Disimulasikan Tiap <i>Tray</i> .....	65
Gambar 4-4	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup.....	66
Gambar 4-5	Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	66
Gambar 4-6	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	67
Gambar 4-7	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	67
Gambar 4-8	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	68
Gambar 4-9	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	68
Gambar 4-10	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	69
Gambar 4-11	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	69
Gambar 4-12	Vektor Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup .....	70
Gambar 4-13	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup.....	71
Gambar 4-14	Hasil Temperatur Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	71
Gambar 4-15	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	72

Gambar 4-16	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	72
Gambar 4-17	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	73
Gambar 4-18	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	73
Gambar 4-19	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	74
Gambar 4-20	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	74
Gambar 4-21	Vektor Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup .....	75
Gambar 4-22	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup.....	76
Gambar 4-23	Hasil Temperatur Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	76
Gambar 4-24	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	77
Gambar 4-25	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup.....	77
Gambar 4-26	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	78
Gambar 4-27	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	78
Gambar 4-28	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	79
Gambar 4-29	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	79
Gambar 4-30	Vektor Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup .....	80
Gambar 4-31	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup.....	81
Gambar 4-32	Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	81
Gambar 4-33	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	82
Gambar 4-34	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup.....	82
Gambar 4-35	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	83
Gambar 4-36	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	83
Gambar 4-37	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	84
Gambar 4-38	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	84
Gambar 4-39	Vektor Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup .....	85
Gambar 4-40	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup.....	86
Gambar 4-41	Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	86
Gambar 4-42	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	87
Gambar 4-43	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup.....	87
Gambar 4-44	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	88
Gambar 4-45	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	88
Gambar 4-46	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	89
Gambar 4-47	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	89

Gambar 4-48	Vektor Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup .....	90
Gambar 4-49	Grafik Hasil Pengujian.....	92
Gambar 4-50	Hasil Optimasi <i>Design for Simulation</i> .....	92
Gambar 4-51	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata.....	93
Gambar 4-52	Hasil Temperatur Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata.....	94
Gambar 4-53	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata.....	94
Gambar 4-54	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata .....	95
Gambar 4-55	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata .....	95
Gambar 4-56	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata .....	96
Gambar 4-57	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata .....	96
Gambar 4-58	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Optimasi Desain Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Merata .....	97
Gambar 4-59	Hasil <i>Scaled Residuals</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	98
Gambar 4-60	Hasil Temperatur Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna.....	98
Gambar 4-61	Distribusi Temperatur <i>Plane XY</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna.....	99
Gambar 4-62	Distribusi Temperatur <i>Isometric</i> Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	99
Gambar 4-63	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-1 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	100
Gambar 4-64	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-2 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	100

Gambar 4-65	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-3 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	101
Gambar 4-66	Distribusi Temperatur <i>Tray</i> Ke-4 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup <i>Heat Flux</i> Sempurna .....	101
Gambar 4-67	Vektor Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup Optimasi Desain .....	102
Gambar 4-68	Analisa 1 Aliran Udara .....	103
Gambar 4-69	Analisa 2 Aliran Udara .....	103
Gambar 4-70	Temperatur Variasi Kecepatan .....	104
Gambar 4-71	Temperatur Variasi Bukaan Katup .....	105
Gambar 4-72	Perbandingan Simulasi dan Pengujian.....	105
Gambar 4-73	Temperatur Sebelum dan Sesudah Optimasi .....	106
Gambar 4-74	Aliran Udara Optimasi Desain.....	107
Gambar 4-75	Perbandingan Penggunaan Kalor.....	108

## DAFTAR NOTASI

%	= <i>Percent</i>
$\rho$	= <i>Density</i>
$\mu$	= <i>Viscosity</i>
$\nabla$	= <i>Gradient Operator</i>
$\partial$	= <i>Differential</i>
$\bar{\tau}$	= <i>Stress Tensor</i>
2D	= <i>Two-Dimensional</i>
3D	= <i>Three-Dimensional</i>
A	= <i>Surface Area</i>
C	= <i>Celcius</i>
c	= <i>Sound Velocity</i>
cm	= <i>Centimeter</i>
Cp	= <i>Specific Heat</i>
CAD	= <i>Computer Aided Design</i>
CFD	= <i>Computational Fluid Dynamics</i>
d	= <i>Diameter</i>
F	= <i>Force</i>
FDM	= <i>Finite Difference Method</i>
FEM	= <i>Finite Element Method</i>
FVM	= <i>Finite Volume Method</i>
g	= <i>Percepatan Gravitasi</i>
$h_c$	= <i>Heat Transfer Coefficient</i>
HV	= <i>Heat Value</i>
J	= <i>Joule</i>
K	= <i>Kelvin</i>
k	= <i>Thermal Conductivity</i>
Kg	= <i>Kilogram</i>
$L_c$	= <i>Characteristic Length</i>
$L_h$	= <i>Hydrodynamic Entrance Length</i>
$L_i$	= <i>Inlet Length</i>

m	= Meter
Ma	= <i>Mach Number</i>
N	= Newton
Nu	= <i>Nusselt Number</i>
p	= <i>Pressure</i>
Pa	= Pascal
q	= <i>Heat Flux</i>
$\dot{q}$	= <i>Heat Generation Rate</i>
$q_m$	= Laju Aliran Massa Fluida
$q_v$	= Laju Aliran Volume Fluida
Re	= <i>Reynolds Number</i>
RPM	= <i>Revolution per Minute</i>
s	= Sekon
T	= <i>Temperature</i>
v	= <i>Velocity</i>
W	= Watt

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Biji kakao atau dikenal dengan biji coklat adalah biji yang berasal dari pohon kakao (*Theobroma cocoa*) yang merupakan bahan dasar dari pembuatan coklat. Kakao memiliki kontribusi yang besar dalam perekonomian Indonesia dengan menduduki urutan ketiga tertinggi sebagai industri pengolahan kakao setelah Belanda dan Pantai Gading (Kemenperin, 2022). Data lain menyebutkan, kakao juga menjadi komoditas ekspor Indonesia terpenting selain minyak dan gas untuk penghasil devisa negara, hal ini membuat Indonesia berada di urutan keenam sebagai negara produsen kakao terbesar di seluruh dunia (Badan Pusat Statistik, 2021).

Pengolahan biji kakao perlu dilakukan untuk meningkatkan kualitas dari biji kakao itu sendiri. Pengolahan pada biji kakao memiliki dua tahapan utama, yaitu fermentasi dan pengeringan (Hatmi & Rustijarno, 2012). Fermentasi dilakukan secara alamiah dalam beberapa hari untuk menjadikan biji kakao bermutu tinggi dan layak konsumsi (Hayati dkk., 2012). Melalui tahapan fermentasi ini akan membentuk prekursor rasa, aroma, dan warna pada biji kakao (Camu dkk., 2008). Proses utama lainnya adalah proses pengeringan. Proses pengeringan biji kakao ini memiliki tujuan untuk mengurangi kadar air yang masih tinggi setelah dipanen yaitu dari berkisar 51,00% - 60,00% menjadi 6,00% - 7,00%. Hal ini jika tidak dilakukan maka akan menyebabkan sulitnya melepas nibs dari kulit dan juga terjadinya pembusukan karena mikroorganisme yang berkembang (Cahyaningrum dkk., 2019).

Pengeringan biji kakao yang dilakukan selama ini adalah dengan cara pengeringan alami, yaitu dengan memanfaatkan matahari sebagai sumber panas. Namun, pengeringan biji kakao ini tidak dapat optimal. Hal ini dikarenakan panas dari matahari yang tidak stabil dan juga terjadinya hujan, sehingga proses pengeringan memakan waktu sehari-hari. Maka dari itu, dibutuhkan alat pengering biji kakao agar pengeringan tersebut dapat berjalan secara optimal.

Alat pengering biji kakao adalah alat pengeringan buatan yang digunakan untuk mengeringkan biji kakao yang sebelumnya telah difermentasi agar dapat berkurang kadar airnya sehingga nantinya dapat diproduksi menjadi bubuk coklat. Supaya kualitas dari biji kakao kering tersebut baik, maka proses pemanasan pada alat pengering harus dilakukan pada temperatur dan distribusi perpindahan kalor yang sesuai. Oleh karena itu, diperlukan simulasi perpindahan kalor menggunakan bantuan perangkat lunak dan juga validasi secara eksperimen untuk mengetahui bagaimana distribusi temperatur yang tepat dan memerlukan waktu berapa lama untuk mencapai temperatur yang diinginkan.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi perpindahan kalor pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* yang juga akan dibandingkan dengan eksperimen pada alat tersebut dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Maka dari penelitian ini akan diketahui bagaimana distribusi temperatur pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* dalam waktu tertentu dan juga bagaimana desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* yang optimal untuk menghasilkan distribusi temperatur yang sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao yang baik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari penelitian atau perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja fenomena-fenomena perpindahan kalor pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* sehingga alat tersebut dapat mengeringkan biji kakao?
2. Apa saja parameter-parameter yang dipertimbangkan ketika melakukan analisis perpindahan kalor menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer*?
3. Bagaimana kemampuan sebelum dan sesudah optimasi desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* baik temperatur terhadap waktu yang sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao maupun dalam menurunkan penggunaan energi?

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian atau perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* menggunakan perangkat lunak *Solidworks 2021*.
2. Simulasi perpindahan kalor pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* menggunakan perangkat lunak *Ansys Student R1 2023*.
3. Pengujian distribusi temperatur menggunakan sensor *thermocouple*.
4. Simulasi dan pengujian untuk mengetahui bagaimana distribusi temperatur terhadap waktu yang diperlukan sesuai karakteristik biji kakao dan mengoptimasi untuk menurunkan penggunaan energi.
5. Pada pengoptimasian untuk menurunkan penggunaan energi, maka peningkatan performa alat hanya memodifikasi dalam bentuk desain dan tidak mengubah alat yang sudah ada.
6. *Properties* yang digunakan adalah material *low carbon steel* dan udara pada temperatur 27,00 °C.
7. Variasi nilai kecepatan udara digunakan 5,00 m/s, 15,00 m/s, dan 25,91 m/s.
8. Variasi nilai *heat flux* digunakan bukaan 1/8, 1/4, dan 1/2 katup.
9. Tipe yang digunakan pada *inlet* dan *outlet* adalah *velocity-inlet* dan *pressure-outlet*.
10. Waktu yang digunakan adalah *transient-state time*.

### 1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan dari penelitian atau perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui fenomena-fenomena perpindahan kalor pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* sehingga alat tersebut dapat mengeringkan biji kakao.
2. Mengetahui parameter-parameter yang dipertimbangkan ketika melakukan analisis perpindahan kalor menggunakan metode

*Computational Fluid Dynamics (CFD)* pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer*.

3. Mengetahui kemampuan sebelum dan sesudah optimasi desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* baik temperatur terhadap waktu yang sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao maupun dalam menurunkan penggunaan energi.

## **1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan**

Manfaat dari penelitian atau perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi pembelajaran dalam menganalisa perpindahan kalor dengan menggunakan metode CFD untuk mengetahui distribusi temperaturnya terhadap waktu, yang dapat diterapkan ke berbagai alat lainnya.
2. Penelitian ini dapat membantu para petani biji kakao untuk mengetahui bagaimana kemampuan dari alat pengering yang mereka gunakan sebagai pengganti dari matahari.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan pada laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. BAB 1 PENDAHULUAN: Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian atau perancangan, manfaat penelitian atau perancangan, dan sistematika penulisan.
2. BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA: Bab ini berisi kajian pustaka dan menjelaskan dasar teori yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan.
3. BAB 3 METODE PENELITIAN: Bab ini menjelaskan langkah-langkah apa saja dan metode apa yang digunakan dalam penelitian.
4. BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN: Bab ini berisi hasil dan juga pembahasan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.
5. BAB 5 PENUTUP: Bab ini merupakan bab akhir dari laporan yang berisi kesimpulan serta saran dari hasil pembahasan dan untuk penelitian selanjutnya.

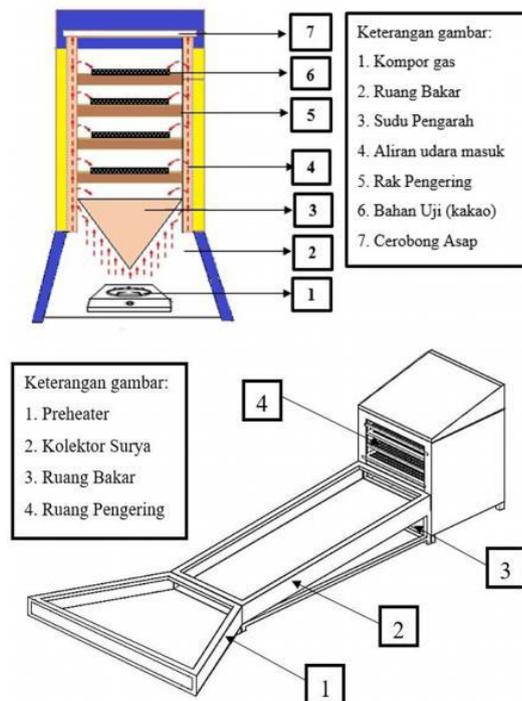
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kajian Pustaka

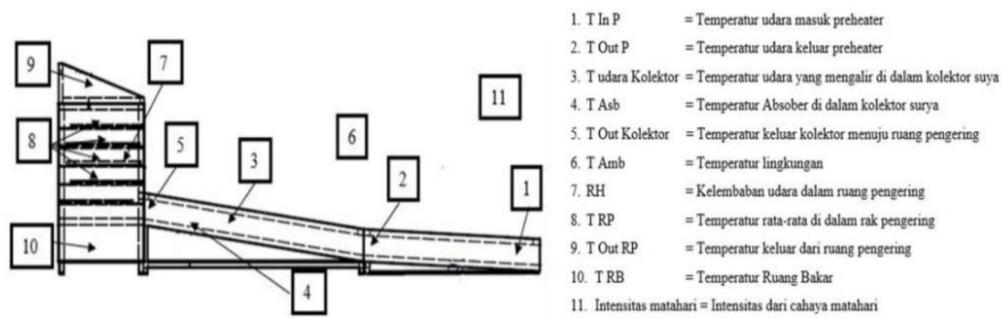
Seiring pesatnya perkembangan inovasi yang sejalan dengan teknologi, telah banyak dilakukan berbagai penelitian ataupun perancangan yang mengkaji tentang alat pengering khususnya untuk biji kakao. Secara garis besar penelitian atau perancangan tersebut bertujuan supaya alat pengering biji kakao dapat menggantikan fungsi dari matahari. Pada kajian pustaka ini akan membahas tentang alat pengering biji kakao yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian lain dan penelitian sebelumnya.

Pada penelitian yang dilakukan Syuhada, dkk. (2018), alat pengering biji kakao yang digunakan memakai sistem energi *hybrid* yaitu dengan energi matahari dan bahan bakar gas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-1 dan Gambar 2-2 sebagai berikut.



Gambar 2-1 Alat Pengering Biji Kakao Sistem *Hybrid*

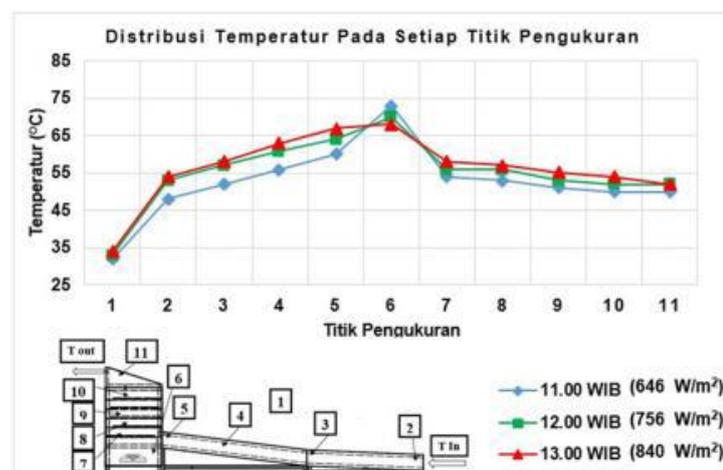
Sumber: (Syuhada dkk., 2018)



Gambar 2-2 Keterangan Alat Pengering Biji Kakao Sistem *Hybrid*

Sumber: (Syuhada dkk., 2018)

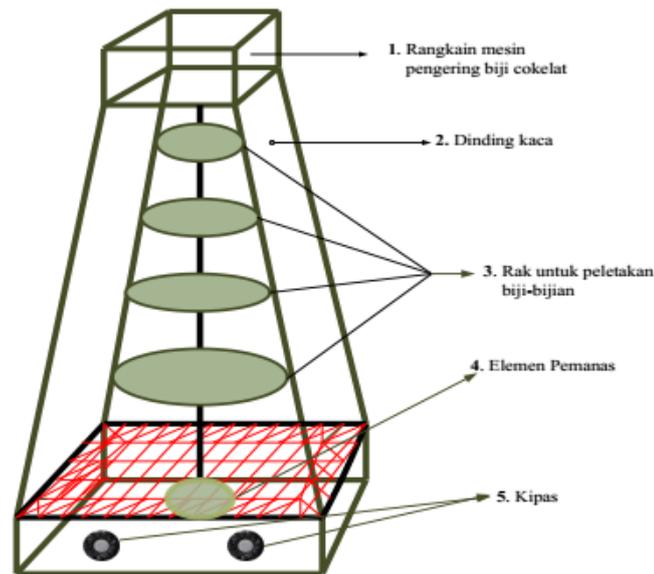
Penelitian ini mengalami kendala dengan intensitas matahari yang menurun diakibatkan cuaca yang berawan sehingga temperatur di dalam kolektor surya juga ikut menurun. Hal ini akan berpengaruh besar apabila cuaca berawan yang berlangsung lama dan *absorber* tidak memiliki penyimpanan energi matahari lagi. Penelitian ini juga hanya dilakukan secara eksperimen langsung dan tidak mempertimbangkan simulasi menggunakan perangkat lunak. Selain itu, hasil eksperimen berupa distribusi temperatur tidak menunjukkan bagaimana temperatur terdistribusi secara merata atau tidak di dalam ruang pengering karena hanya menunjukkan temperatur rata-rata di dalam ruang pengering dan tidak diketahui titik mana saja yang diambil pada ruang pengering, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-3 sebagai berikut.



Gambar 2-3 Distribusi Temperatur Pengering Biji Kakao Sistem *Hybrid*

Sumber: (Syuhada dkk., 2018)

Meriadi, dkk. (2018) melakukan pembuatan alat pengering biji kakao dengan model wadah putar dan sumber panasnya adalah pemanas listrik. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat elemen pemanas ini antara lain *korm-nikel*, *korm-nikel-besi*, dan *korm-nikel-aluminium*. Bentuk perancangan alat pengering biji kakao dengan model wadah putar dan sumber panasnya adalah pemanas listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-4 sebagai berikut.



Gambar 2-4 Alat Pengering Biji Kakao dengan Pemanas Listrik

Sumber: (Meriadi dkk., 2018)

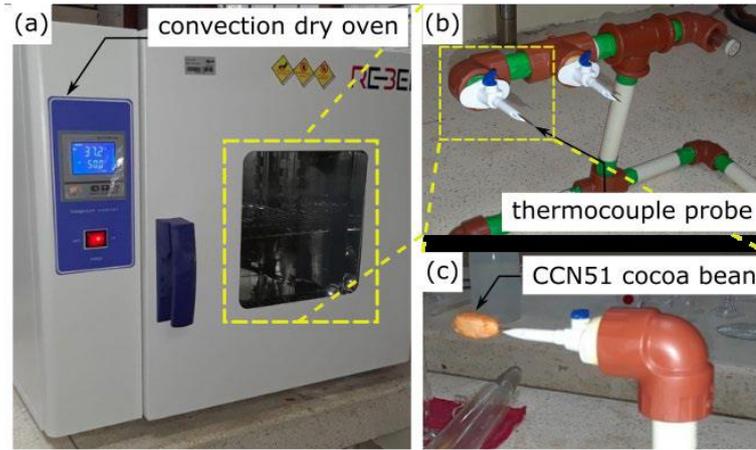
Wadah dibuat dengan model dapat diputar supaya panas dapat terdistribusi merata dan pengeringan menjadi lebih baik. Namun, berdasarkan eksperimen yang dilakukan secara langsung tidak menjelaskan alat dan metode cara pengukuran temperaturnya. Kemudian pada hasil eksperimennya juga hanya menunjukkan nilai temperatur pada waktu-waktu tertentu. Sehingga, tidak dapat diketahui bagaimana distribusi temperaturnya dan apakah model wadah putar untuk biji kakao tersebut menjadi pilihan yang tepat untuk digunakan. Hasil dari eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2-5 sebagai berikut.

Waktu (menit)	Suhu C <sup>0</sup>	Keadaan Biji Cokelat
5	33 <sup>0</sup>	Basah
10	38 <sup>0</sup>	Basah
15	41 <sup>0</sup>	Basah
20	44 <sup>0</sup>	Lembab
25	47 <sup>0</sup>	Lembab
30	47 <sup>0</sup>	Lembab
35	48 <sup>0</sup>	Lembab
40	49 <sup>0</sup>	Lembab
45	49 <sup>0</sup>	Lembab
50	50 <sup>0</sup>	Mulai Kering
55	50 <sup>0</sup>	Mulai Kering
60	55 <sup>0</sup>	Mulai Kering
120	60 <sup>0</sup>	Kering

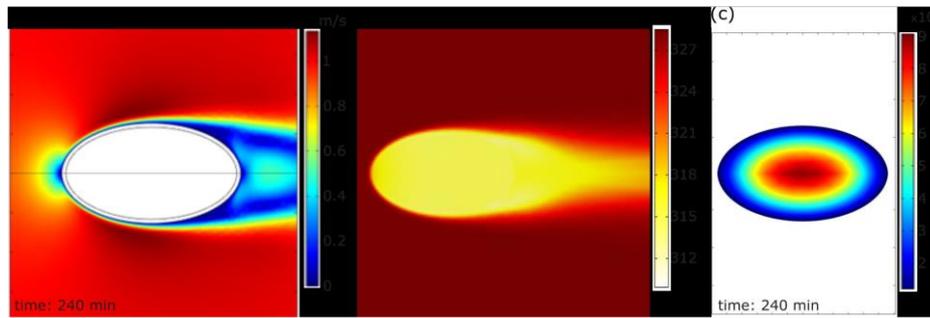
Gambar 2-5 Hasil Eksperimen menggunakan Alat Pengering Biji Kakao dengan Pemanas Listrik

Sumber: (Meriadi dkk., 2018)

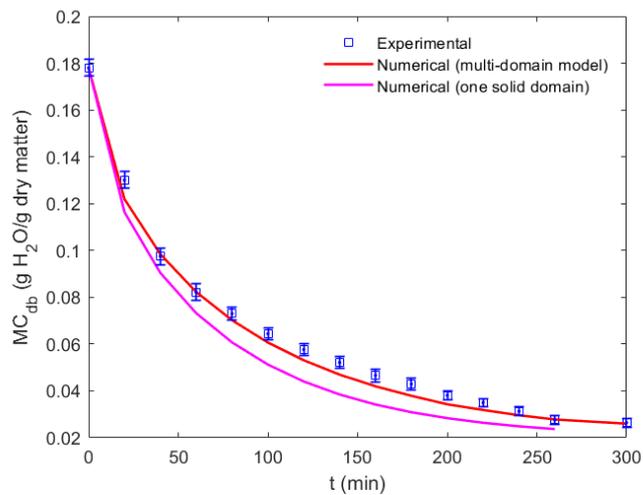
Castillo-Orozco dkk. (2023) melakukan penelitian yaitu *drying kinetics* yang terjadi di dalam biji kakao CCN51 untuk memodelkan perubahan kandungan kelembaban selama proses pengeringan. Penelitian tersebut membahas bagaimana karakteristik biji kakao CCN51 saat mengalami perpindahan massa dan panas dengan tujuan dapat mengetahui bagaimana mekanisme pengeringan yang optimal. Penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi CFD (baik menggunakan *multi-domain model* dan *one solid model*) dan eksperimen menggunakan alat *convection dry oven* dengan suhu konstan 50,00°C. Dalam hasil penelitian ini, *drying kinetics* diprediksi menggunakan *diffusion approximation model* dan didapatkan rasio kelembaban yang dapat digunakan untuk pengeringan biji kakao yang optimal. Alat dan hasil dari penelitian yang dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 2-6, Gambar 2-7, Gambar 2-8, dan Gambar 2-9 berturut-turut sebagai berikut.



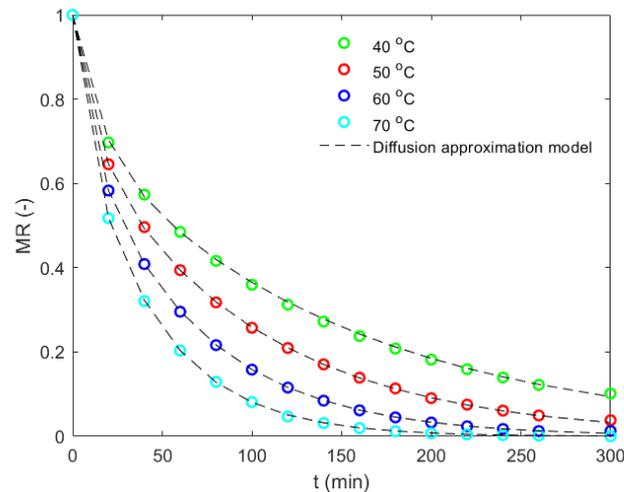
Gambar 2-6 Alat *Convection Dry Oven*  
 Sumber: (Castillo-Orozco dkk., 2023)



Gambar 2-7 Visualisasi Komputasi Kecepatan, Distribusi Temperatur, dan Konsentrasi Kelembaban pada Biji Kakao CCN51  
 Sumber: (Castillo-Orozco dkk., 2023)



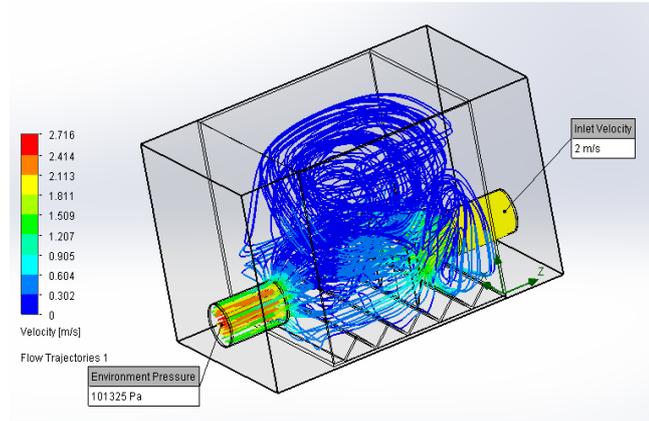
Gambar 2-8 Hasil Kadar Air dengan Waktu Pengeringan  
 Sumber: (Castillo-Orozco dkk., 2023)



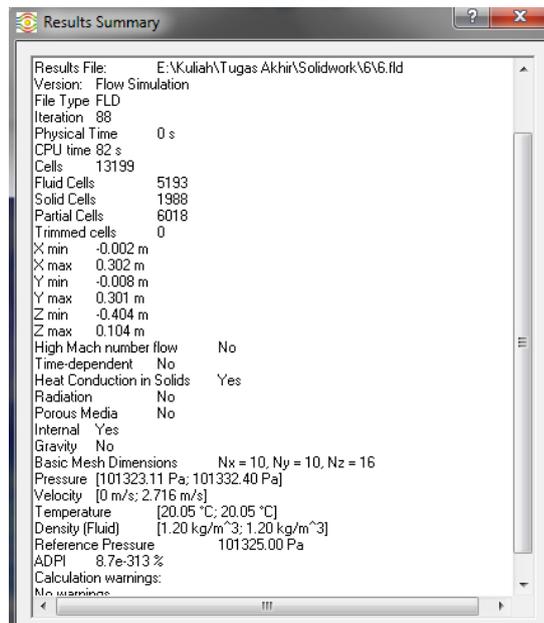
Gambar 2-9 Hasil Rasio Kelembaban dengan Waktu Pengeringan menggunakan *diffusion approximation model*

Sumber: (Castillo-Orozco dkk., 2023)

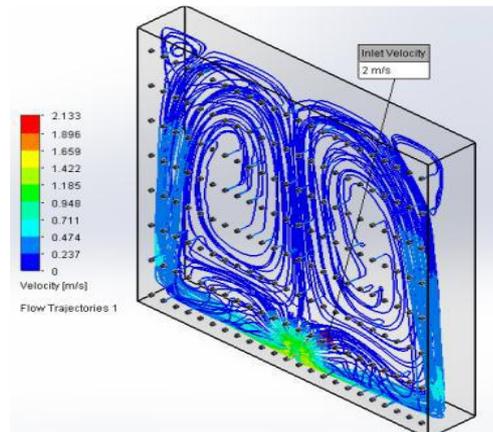
Pada penelitian Imami (2018), dengan alat pengering yang sama dengan yang digunakan dalam penelitian ini, hanya melakukan simulasi aliran udara saja baik pada *heat exchanger* maupun saluran pembagi udara ruang pengering. Sedangkan pada penelitian Hendrawan (2018), melakukan eksperimen untuk mengetahui temperatur pada alat pengering dengan menggunakan *thermometer*. Kelemahannya dari eksperimen ini adalah dengan menggunakan *thermometer* hanya mengetahui temperatur di sekitar *thermometer* saja tidak pada keseluruhan ruang pengering tersebut. Hal ini menyebabkan tidak diketahuinya bagaimana distribusi temperatur pada ruang pengering tersebut. Hasil simulasi aliran udara ditunjukkan seperti pada Gambar 2-10, Gambar 2-11, Gambar 2-12, dan Gambar 2-13 berturut-turut dibawah ini.



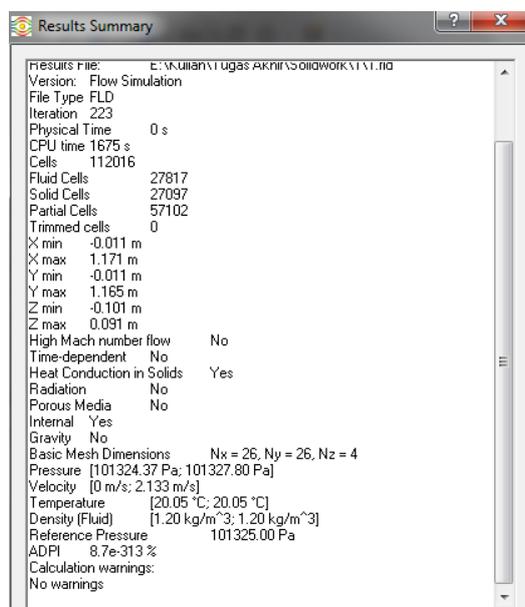
Gambar 2-10 Visualisasi Aliran Udara pada *Heat Exchanger*  
 Sumber: (Imami, 2018)



Gambar 2-11 Hasil Simulasi Aliran Udara pada *Heat Exchanger*  
 Sumber: (Imami, 2018)



Gambar 2-12 Visualisasi Aliran Udara pada Saluran Ruang Pengering  
 Sumber: (Imami, 2018)



Gambar 2-13 Hasil Simulasi Aliran Udara pada Saluran Ruang Pengering  
 Sumber: (Imami, 2018)

Berdasarkan dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, para peneliti hanya melakukan eksperimen saja tanpa melakukan perbandingan dengan simulasi perangkat lunak. Selain itu, hasil dari temperaturnya juga tidak menjelaskan bagaimana bentuk distribusinya sehingga tidak diketahui apakah merata atau tidak. Peneliti sebelumnya yang menggunakan alat pengering yang sama dengan penelitian ini melakukan simulasi dengan perangkat lunak. Namun, hanya melakukan simulasi bagaimana aliran udara tersebut bergerak sehingga tidak diketahui apakah alat pengering tersebut optimal tidak dalam mengeringkan

biji kakao. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan hal yang tidak dilakukan pada penelitian lain yaitu menganalisis perpindahan kalor secara simulasi dengan metode CFD dan pengujian secara langsung di beberapa titik untuk mengetahui distribusi temperatur pada waktu tertentu. Selain itu, akan dilakukan pengoptimalan desain untuk menurunkan penggunaan energi yang bertujuan agar konsumsi gas LPG dapat serendah mungkin.

## **2.2 Dasar Teori**

Perancangan dan juga analisis baik secara simulasi dan eksperimen memerlukan beberapa teori untuk melandasi berbagai rangkaian proses yang dilakukan. Berikut merupakan dasar teori yang melandasi dari perancangan dan analisis perpindahan kalor alat pengering biji kakao tipe *tray dryer*.

### **2.2.1 Karakteristik Pengeringan Biji Kakao**

Pengeringan biji kakao dilakukan untuk mengurangi kadar air yang masih tinggi di dalam biji kakao tersebut. Menurut petani biji kakao yang berada di Gunung Kidul yang merupakan target dari penelitian ini, temperatur yang baik digunakan untuk mengeringkan biji kakao adalah berkisar 45,00 °C - 55,00 °C hal ini bertujuan supaya biji kakao tidak menjadi rusak. Sedangkan menurut Putri (2021), pada penelitiannya, temperatur yang diperlukan supaya proses pengeringan dapat mengurangi kadar air pada biji kakao adalah berkisar antara 50,00 °C - 60,00 °C.

Selain untuk mengurangi kadar air yang masih tinggi, perlakuan temperatur pengeringan juga memberikan pengaruh pada warna dan kadar lemak. Suhu optimal untuk mendapatkan kadar air, kadar lemak, dan warna yang paling baik (coklat) berada di suhu 55,00 °C (Sidabariba dkk., 2017).

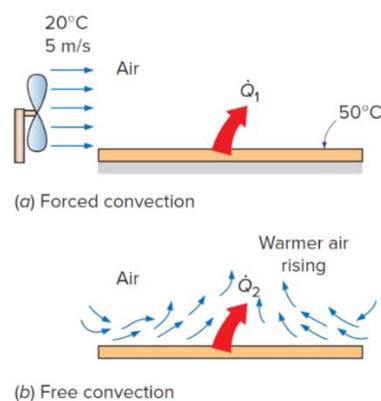
### **2.2.2 Perpindahan Kalor**

Perpindahan kalor atau perpindahan panas (*heat transfer*) adalah perpindahan energi dari suatu tempat ke tempat lainnya yang dikarenakan di tiap-tiap tempat tersebut mengalami perbedaan suhu. Perpindahan kalor tidak hanya mengenai energi panas berpindah dari suatu tempat ke tempat lain, melainkan

juga menjelaskan dan memprediksi bagaimana laju perpindahan yang terjadi di kondisi-kondisi tertentu (Holman & Jasjfi, 1995).

Perpindahan kalor dapat terjadi dengan tiga fenomena, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga fenomena perpindahan kalor tersebut memerlukan adanya perbedaan suhu dimana ketiganya dapat berlangsung dari media bersuhu tinggi ke media bersuhu lebih rendah (Jamaluddin, 2018). Dalam proses perpindahan kalor, perpindahan dapat terjadi lebih dari satu fenomena. Dimana tiap-tiap fenomena tersebut dapat saling mempengaruhi dan berkontribusi satu sama lain terhadap total perpindahan kalor, hal ini dinamakan sebagai perpindahan kalor konjugasi atau *conjugate heat transfer* (Huc, 2014).

Konveksi adalah perpindahan kalor yang disertai dengan berpindahnya massa atau molekul zat yang dipanaskan. Penyebab terjadinya konveksi adalah perbedaan suhu pada fluida yang akan berakibat berat jenis yang berbeda juga, sehingga suhu akan berpindah dari yang tinggi ke yang rendah (Jamaluddin, 2018). Konveksi terbagi menjadi dua, yaitu konveksi alami (*natural convection/free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*) (Engineers Edge, t.t.). Konveksi alami terjadi karena perbedaan kepadatan atau suhu pada fluida, sedangkan pada konveksi paksa terjadi karena fluida dipaksa mengalir melewati permukaan padat yang berbeda suhu oleh agen eksternal seperti kipas ataupun pompa (Welty dkk., 2007). Ilustrasi mengenai konveksi alami dan paksa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-14 sebagai berikut.



Gambar 2-14 Konveksi Alami dan Konveksi Paksa

Sumber: (Çengel dkk., 2017)

Konveksi sangat bergantung pada *properties* dari fluida, viskositas, konduktivitas termal, densitas, kalor spesifik, dan kecepatan. Maka dari itu, konveksi mejadi perpindahan panas paling kompleks karena banyaknya keterlibatan sebuah variabel (Çengel dkk., 2017). Laju perpindahan panas konveksi berhubungan sekali dengan persamaan *Newton's law of cooling*. Dimana, fenomena konveksi digambarkan dalam persamaan tersebut sebagai berikut.

$$\dot{Q} = h_c A \Delta T \quad (2.1)$$

Dimana  $\dot{Q}$  adalah laju perpindahan panas dalam W,  $h_c$  adalah *heat transfer coefficient* dalam  $W/(m^2.K)$ ,  $A$  adalah luas permukaan dalam  $m^2$ , dan  $T$  adalah temperatur dalam K. Konveksi juga erat dikaitkan dengan *Nusselt number*, *Prandtl number*, dan *Reynold number* karena ketiga bilangan ini memiliki hubungan dengan *heat transfer coefficient*. Dimana semakin tinggi *Nusselt number*, maka semakin tinggi juga nilai dari *heat transfer coefficient*. Seperti yang dijelaskan pada persamaan berikut.

$$Nu = \frac{(h_c \times L_c)}{k} \quad (2.2)$$

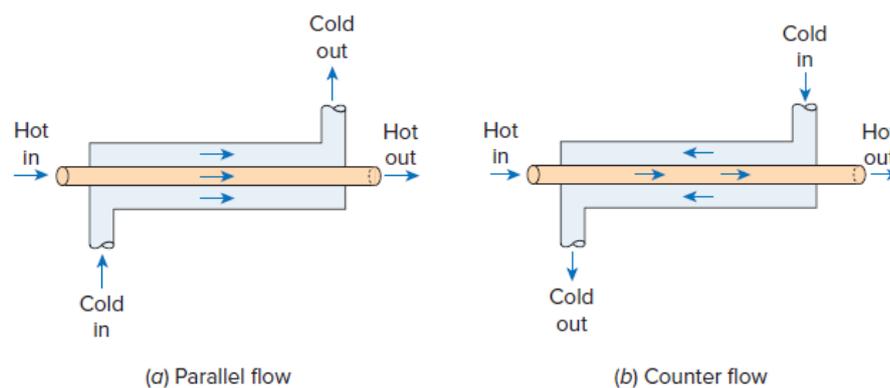
Dimana  $Nu$  adalah *Nusselt number*,  $h_c$  adalah *heat transfer coefficient* dalam  $W/(m^2.K)$ ,  $k$  adalah *thermal conductivity* dalam  $W/(m.K)$ , dan  $L_c$  adalah panjang karakteristik dalam m. Sedangkan *Prandtl number* dan *Reynolds number* memiliki hubungannya dengan *Nusselt number*, seperti dengan menggunakan metode *Dittus-Boelter* hubungan antara keterkaitan semuanya seperti yang dijelaskan pada persamaan berikut.

$$0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^n = \frac{(h_c \times L_c)}{k} \quad (2.3)$$

Dimana  $Re$  adalah *Reynolds number*,  $Pr$  adalah *Prandtl number*,  $h_c$  adalah *heat transfer coefficient* dalam  $W/(m^2.K)$ ,  $k$  adalah *thermal conductivity* dalam  $W/(m.K)$ , dan  $L_c$  adalah panjang karakteristik dalam m.

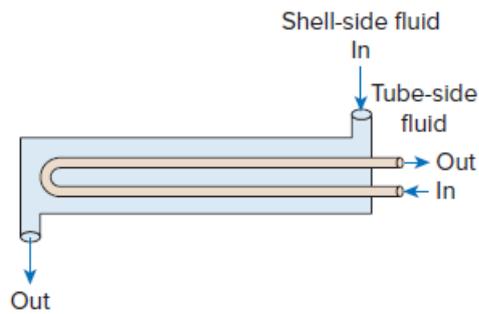
### 2.2.3 Heat Exchanger

*Heat Exchanger* adalah sebuah alat yang dapat menukarkan panas atau kalor antara dua fluida yang memiliki suhu yang berbeda (Al-Sammarraie & Vafai, 2017). *Heat exchanger* biasanya melibatkan fenomena konveksi di setiap fluidanya dan juga konduksi sebagai dinding pemisah antara dua fluida. *Heat exchanger* dibuat dengan berbagai jenis, salah satunya yang paling sederhana adalah *double-pipe heat exchanger*. Dimana memiliki dua tipe dari arah alirannya, yaitu tipe *parallel-flow* dan tipe *counter-flow*. Tipe *parallel-flow* memiliki ciri dimana fluida panas dan dingin masuk di *inlet* yang berdekatan dan bergerak ke arah yang sama untuk keluar di *outlet* yang berdekatan juga. Sedangkan tipe *counter-flow* memiliki ciri dimana fluida panas dan dingin masuk di *inlet* yang berjauhan sehingga bergerak ke arah yang berlawanan untuk keluar di *outlet*. Jenis *heat exchanger* lain yang umum digunakan di industri adalah *shell and tube* dan *plate heat exchanger* (Çengel dkk., 2017). Jenis-jenis dari *heat exchanger* tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-15, Gambar 2-16, dan Gambar 2-17 sebagai berikut.

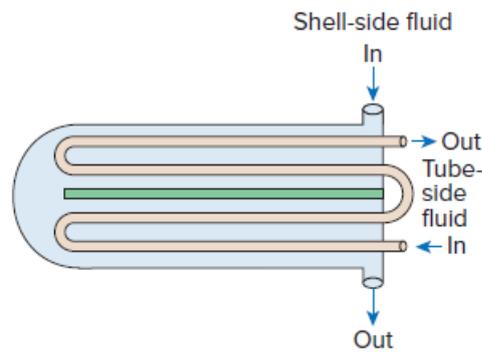


Gambar 2-15 *Double-pipe Heat Exchanger*

Sumber: (Çengel dkk., 2017)



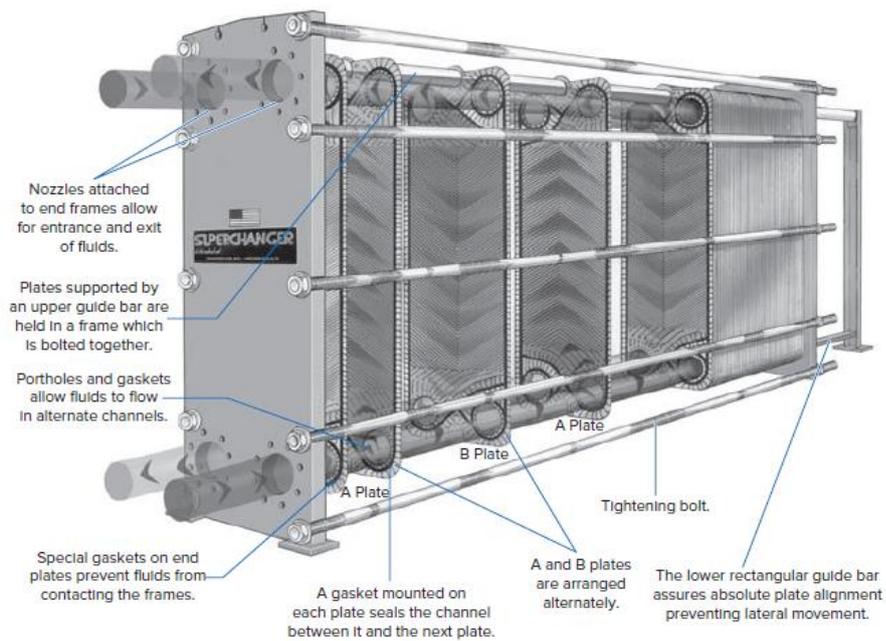
(a) One-shell pass and two-tube passes



(b) Two-shell passes and four-tube passes

Gambar 2-16 *Shell and Tube Heat Exchanger*

Sumber: (Çengel dkk., 2017)



Gambar 2-17 *Plate Heat Exchanger*

Sumber: (Çengel dkk., 2017)

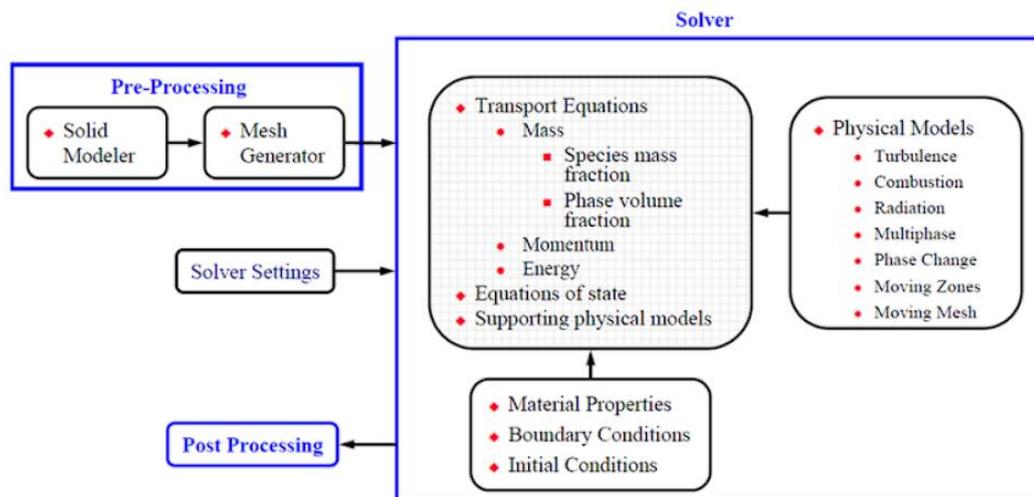


manusia, dimana dalam prosesnya tersebut juga semakin dimudahkan karena perancangannya yang menggunakan komputer.

### 2.2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah sebuah alat untuk mensimulasikan dan memodelkan berbagai kondisi aliran fluida seperti memprediksi panas, massa, dan transfer momentum dengan menggunakan komputer dan matematika sebagai penerapannya (Xia & Sun, 2002).

CFD bekerja menggunakan pendekatan diskritisasi yaitu dengan membagi domain aliran fluida menjadi elemen-elemen diskrit yang lebih kecil, proses tersebut dinamakan *mesh*. Pada setiap elemen diskrit di dalam *mesh* tersebut selanjutnya akan menerapkan metode numerik seperti FEM (*Finite Element Method*), FDM (*Finite Difference Method*), dan FVM (*Finite Volume Method*) untuk memecahkan persamaan differensial pada aliran fluida menjadi numerik (Hirsch, 2007). Hal ini diperlukan karena komputer hanya mampu memproses informasi yang sifatnya solusi numerik, bukan solusi analitis dari persamaan differensial. Sehingga persamaan differensial perlu ditransformasikan menjadi numerik. Menurut Norton dkk. (2007), CFD memiliki tiga langkah utama dalam alur pengerjaannya, yaitu *pre-processing*, *processing/solver*, dan *post-processing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-19 sebagai berikut.



Gambar 2-19 Tahapan Pengerjaan CFD

Sumber: (Pachpute, 2022)

### 2.2.5.1 Karakteristik Fluida

Karakteristik fluida adalah sifat-sifat atau kondisi yang menggambarkan perilaku dari fluida tersebut. Mengkarakterisasi fluida penting dilakukan pada CFD karena bertujuan supaya dapat memudahkan dalam memodelkan kondisi yang ada, sehingga hasil dari simulasi CFD akan menjadi tepat. Beberapa hal yang harus dikarakterisasi diantaranya sebagai berikut.

#### 1. *Compressible* dan *Incompressible*

*Compressible* dan *incompressible* adalah sifat fluida yang berdasarkan perubahan densitas fluida terhadap perubahan tekanan. *Compressible* adalah fluida yang mengalami perubahan densitas yang signifikan sehingga densitas fluidanya dianggap tidak konstan, sedangkan *incompressible* kebalikannya dimana densitas fluidanya dianggap konstan. Untuk mengetahui sebuah aliran memiliki sifat *compressible* atau *incompressible* dapat diketahui dengan cara menghitung dengan persamaan *Mach Number* seperti berikut (White, 2006).

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2.4)$$

Dimana *Ma* adalah *Mach number*, *v* adalah kecepatan fluida dalam m/s, dan *c* adalah kecepatan suara dalam media aliran dalam m/s, dimana kecepatan suara pada temperatur 27,00 °C menurut National Physical Laboratory (2018) sebesar 348,39 m/s. Ketika *Mach number* kurang dari 0,30 maka aliran dianggap sebagai *incompressible*. Sedangkan apabila *Mach number* lebih dari 0,30 aliran dianggap *compressible* karena perubahan densitas tidak dapat diabaikan (Anderson, 2007).

#### 2. *Laminar* dan *Turbulen*

*Laminar* adalah jenis aliran fluida yang memiliki pola aliran teratur dan terjadi pada kecepatan yang rendah. *Turbulen* adalah jenis aliran fluida yang memiliki pola aliran tidak teratur dan acak, biasanya terjadi pada kecepatan tinggi. Untuk mengetahui apakah suatu aliran termasuk ke dalam *laminar* atau *turbulen* dapat dicari dengan menggunakan perhitungan *Reynolds number*. *Reynolds number* didefinisikan sebagai berikut (Ghahfarokhi dkk., 2019).

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.5)$$

Dimana  $Re$  menunjukkan *Reynolds number*,  $\rho$  menunjukkan densitas fluida dalam  $\text{kg/m}^3$ ,  $v$  menunjukkan kecepatan fluida dalam  $\text{m/s}$ ,  $d$  menunjukkan diameter pipa aliran dalam  $\text{m}$ , dan  $\mu$  adalah viskositas fluida dalam  $\text{kg/m.s}$ . *Reynolds number* yang kurang dari 2.300 adalah aliran *laminar*, sedangkan lebih dari 10.000 adalah aliran *turbulen*. *Reynolds number* yang berada di antara 2.300-10.000 disebut sebagai aliran *transient* (Ghahfarokhi dkk., 2019).

### 3. *Single-phase flow* dan *Multi-phase flow*

*Single-phase flow* adalah kondisi pada sistem dimana hanya ada satu keadaan materi pada aliran fluida. Fluida dalam sistem dianggap homogen di seluruh domain aliran. *Multi-phase flow* adalah kebalikannya dimana kondisi pada sistem terdapat lebih dari satu keadaan materi pada aliran fluida, dapat berupa gas-gas, cair-cair, dan gas-cair (Fanchi & Christiansen, 2016).

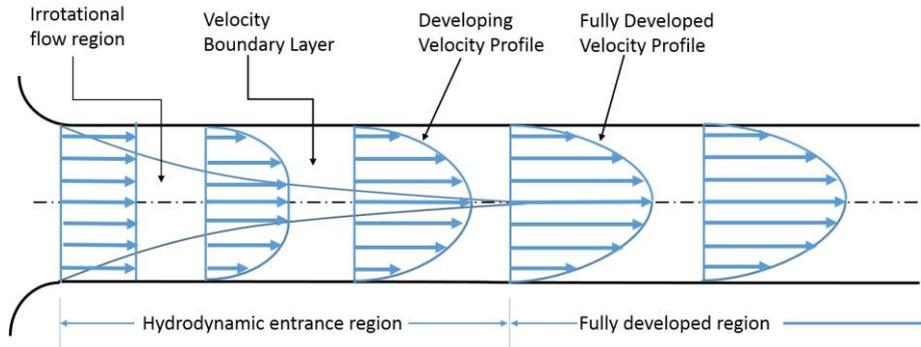
### 4. *Steady-state* dan *Unsteady-state*

*Steady-state* adalah kondisi dimana variabel tidak berubah terhadap waktu, semua variabel dan parameter sistem sudah mencapai titik keseimbangan sehingga tidak ada perubahan yang terjadi. Sedangkan *unsteady-state* atau *transient-state* adalah kondisi dimana variabel berubah seiring berjalannya waktu dari satu keadaan ke keadaan lainnya.

### 5. *Velocity Profile*

*Velocity profile* atau profil kecepatan adalah bagaimana bentuk distribusi kecepatan fluida pada suatu penampang melintang yang ada di dalam aliran fluida, ini menggambarkan kecepatan fluida bervariasi dari tengah aliran hingga mendekati dinding (Salama, 2021). *Velocity profile* yang mengalami kondisi dengan distribusi yang stabil disebut *fully-developed flow*. *Fully-developed flow* umumnya berbentuk parabolik dimana kecepatan di tengah atau puncak parabolik adalah yang tertinggi, sedangkan yang mendekati dinding adalah yang terendah. Aliran *fully-developed* akan terbentuk setelah memasuki *fully-developed region*. Diperlukan perhitungan untuk mengetahui berapa panjang *hydrodynamic entrance region* dengan karakteristik aliran tertentu sehingga dapat mencapai *fully-developed flow* (Cengel & Cimbala, 2006). Ilustrasi proses berkembangnya

aliran menjadi *fully-developed* dijelaskan seperti pada Gambar 2-20 sebagai berikut.



Gambar 2-20 Proses *fully-developed flow*

Sumber: (Cengel & Cimbala, 2006)

Perhitungan untuk mengetahui berapa panjang *hydrodynamic entrance region* baik dalam keadaan laminar atau turbulen menurut (Bergman dkk., 2011a) dan Cengel & Cimbala (2018) berturut-turut adalah sebagai berikut.

$$L_{h,laminar} = 0,0575dRe \quad (2.6)$$

$$L_{h,turbulen} = 1,359d(Re)^{1/4} \quad (2.7)$$

$L_h$  menunjukkan panjang *hydrodynamic entrance region* dalam m,  $d$  adalah diameter pipa dalam m,  $Re$  adalah bilangan *Reynolds*.

### 2.2.5.2 Governing Equation

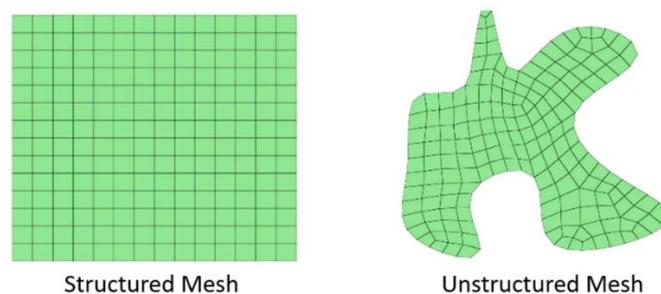
*Governing equation* adalah persamaan matematis yang menggambarkan dalam perumusan hukum fisika yang sesuai dengan kondisi perilaku yang terjadi pada sistem. *Governing equation* menjadi sangat penting untuk CFD karena akan memudahkan dalam memodelkan perilaku fluida dalam sistem dengan tepat, sehingga hasil dari simulasi CFD juga akan sesuai dengan apa yang diinginkan. Menurut Anderson (1992), ada tiga prinsip fisika dasar yang mendasari semua *fluid dynamics*, tiga prinsip itu adalah sebagai berikut.

1. Konservasi massa
2. Hukum kedua *Newton*
3. Konservasi energi

Dari prinsip fisika dasar ini maka akan diambil yang sesuai dengan kondisi perilaku yang sesuai pada sistem dan dijadikan persamaan matematis dimana untuk fluida yang mengalir adalah persamaan kontinuitas dan persamaan momentum, sedangkan apabila terjadi perpindahan panas akan melibatkan persamaan konservasi energi (Norton dkk., 2007). Persamaan matematis yang akan digunakan pada penelitian ini akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian pendefinisian model.

### 2.2.5.3 Mesh

*Mesh* adalah proses membagi domain menjadi elemen-elemen diskrit yang lebih kecil. *Mesh* diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu *structured mesh*, *unstructured mesh*, dan *hybrid mesh*. *Structured mesh* memiliki pola yang teratur dalam penempatan sel-selnya. Jenis elemen yang biasanya digunakan adalah *quadrilateral* pada 2D dan *hexahedra* pada 3D (Castillo, 1991). Sedangkan *unstructured mesh* memiliki pola yang tidak teratur dan jenis elemen yang biasanya digunakan adalah *triangle* pada 2D dan *tetrahedral* pada 3D (Mavriplis, 1996). Kemudian *hybrid mesh* merupakan gabungan dari *structured mesh* dan *unstructured mesh*, dimana bagian geometri yang teratur dapat menggunakan *structured mesh* sedangkan bagian geometri yang kompleks dapat menggunakan *unstructured mesh* (Bern & Plassmann, 2000). Gambar untuk klasifikasi *mesh* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-21 sebagai berikut.

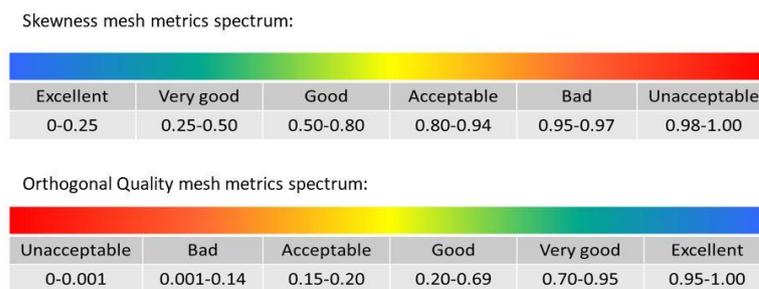


Gambar 2-21 Klasifikasi *Mesh*

Sumber: (Allison, 2020)

*Mesh quality* adalah acuan sejauh mana *mesh* yang digunakan dalam simulasi mampu mempresentasikan dengan baik. Salah satu *mesh quality* yang

harus diperhatikan di *Ansys Fluent* adalah *skewness* dan *orthogonal quality* (Fatchurrohman & Chia, 2017). *Skewness* mengacu pada sejauh mana elemen di dalam *mesh* mendekati bentuk yang ideal, semakin nilainya kecil maka semakin baik. Sedangkan *orthogonal quality* mengacu pada sejauh mana sudut diantara elemen *mesh* dan garis normal pada permukaan mendekati 90,00°, dimana pada *Ansys Fluent* tidak akan melakukan kalkulasi apabila *orthogonal quality* dibawah 0,01 karena semakin nilainya kecil maka semakin buruk. Seperti pada Gambar 2-22 sebagai berikut.



Gambar 2-22 *Skewness* dan *Orthogonal Quality*

Sumber: (Fatchurrohman & Chia, 2017)

*Mesh dependency* adalah salah satu cara untuk mengetahui bagaimana keoptimalan hasil simulasi berdasarkan *mesh*. Pada prinsipnya, semakin kecil ukuran elemen maka semakin tinggi keakuratan dari sebuah hasil simulasi, namun itu tidak sejalan dengan waktu untuk mensimulasikannya (*calculation time*). *Calculation time* akan semakin besar sehingga proses kalkulasi akan berlangsung semakin lama, sehingga simulasi menjadi tidak optimal. Untuk itulah digunakan *mesh dependency* agar dapat diketahui bagaimana simulasi berdasarkan pengaturan *mesh* yang optimal. Pada simulasi CFD apabila perbedaan antara kedua data dibawah 5,00%, maka dapat dikatakan simulasi CFD berjalan optimal (Nawawi dkk., 2015). Perhitungan yang digunakan untuk menghitung *relative error* dari *mesh dependency* adalah sebagai berikut.

$$\text{Perbedaan Data (\%)} = \frac{\text{Data}_n - \text{Data}_1}{\text{Data}_1} \times 100 \quad (2.8)$$

Dimana data n merupakan data yang dicari atau data pembandingnya, sedangkan data 1 merupakan data yang dijadikan sebagai acuan untuk membandingkan.

#### **2.2.5.4 Boundary Condition**

*Boundary condition* atau juga disebut sebagai kondisi batas merupakan penetapan pada suatu batas domain dengan mendefinisikan bagaimana variabel fisik tersebut dalam hal ini adalah fluida berperilaku di batas domain tersebut. *Boundary condition* menjadi penting dilakukan terutama pada CFD karena dalam mensimulasi tidak hanya memodelkan karakteristik aliran fluidanya saja tetapi juga batas domain tersebut untuk menetapkan apakah ada pengaruh dari lingkungan luar domain tersebut terhadap aliran fluida. Pada fenomena yang mengalami perpindahan panas, biasanya terdapat tiga jenis *boundary condition* yang sering ditemui (Bergman dkk., 2011b), diantaranya sebagai berikut.

##### 1. Kondisi *Dirichlet*

Kondisi *Dirichlet* atau *first-type boundary condition* adalah kondisi dengan situasi dimana permukaan dipertahankan pada temperatur yang tetap. Sehingga temperatur didefinisikan secara langsung dan tidak berubah.

##### 2. Kondisi *Neumann*

Kondisi *Neumann* atau *second-type boundary condition* adalah kondisi dimana perpindahan panas bergantung dengan perbedaan suhu temperatur antara sistem dan lingkungannya. Sehingga terdapat gradien temperatur di permukaan yang terkait dengan *heat flux* yang dapat dinyatakan dengan persamaan dari *Fourier's law* yang akan dibahas di bagian pendefinisian model pada penulisan ini.

##### 3. Kondisi *Robin*

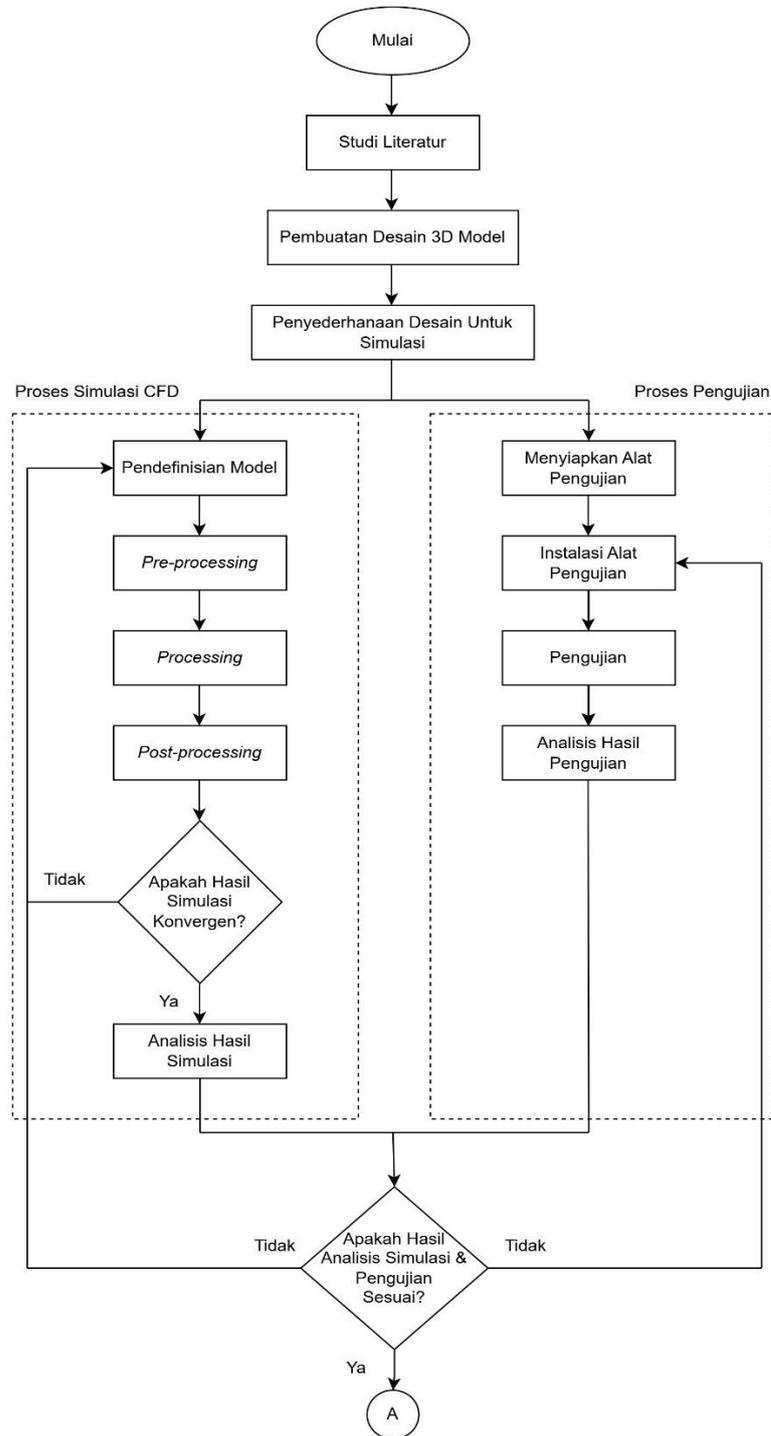
Kondisi *Robin* atau *third-type boundary condition* adalah kondisi yang menggabungkan kombinasi dari nilai variabel dan gradiennya pada batas domain sehingga disebut juga sebagai *mixed boundary condition*. Ini berhubungan dengan peristiwa konveksi sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan dari *Newton's law of cooling* dimana yang ditentukan adalah koefisien perpindahan panasnya.

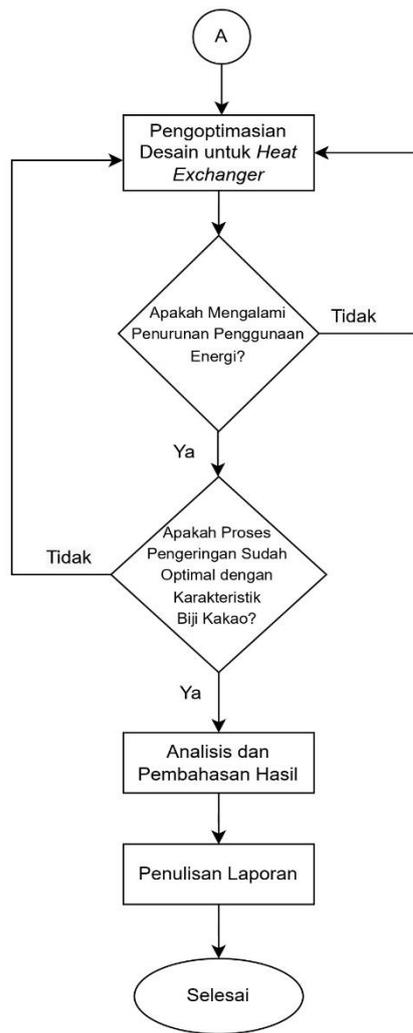
# BAB 3

## METODE PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian

Alur penelitian ini seperti pada Gambar 3-1 sebagai berikut.





Gambar 3-1 Alur Penelitian

### 3.2 Peralatan dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengerjaan penelitian ini beserta fungsinya seperti yang ada pada Tabel 3-1 dan Tabel 3-2 berturut-turut sebagai berikut.

Tabel 3-1 Alat

No.	Alat	Fungsi
1.	Laptop	Perangkat keras untuk proses desain, proses simulasi, dan pengolahan data
2.	<i>Solidworks 2021</i>	Perangkat lunak dalam pembuatan 3D Model
3.	<i>Ansys Student R1 2023</i>	Perangkat lunak dalam proses simulasi dengan metode CFD
4.	<i>Digital Thermo Reader</i>	Alat untuk memvisualisasikan hasil dari pengukuran temperatur
5.	<i>Thermocouple K-type Probe Wire</i>	Sensor untuk membaca temperatur

Tabel 3-2 Bahan

No.	Bahan	Fungsi
1.	<i>File Desain Alat Pengereng</i>	<i>File</i> sebagai geometri dalam proses simulasi dengan metode CFD
2.	Gas LPG 3 Kg	Sumber panas untuk melakukan pengujian
3.	Listrik	Sumber tenaga blower dalam melakukan pengujian

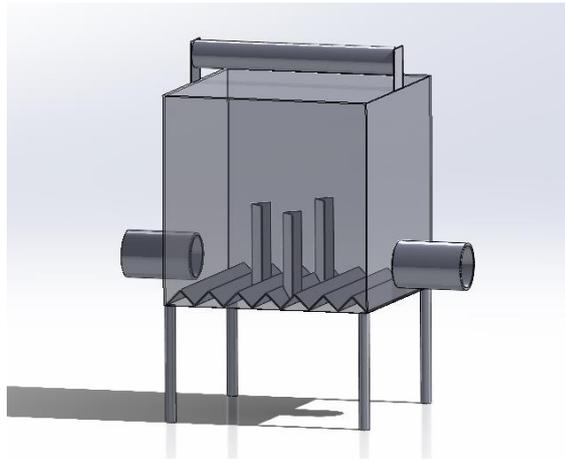
### 3.3 Proses Pembuatan Desain 3D Model

Pada tahapan proses pembuatan desain 3D model dari alat pengereng biji kakao tipe tray dryer ini menggunakan perangkat lunak *Solidworks 2021*. Proses ini memiliki dua tahapan sebagai berikut.

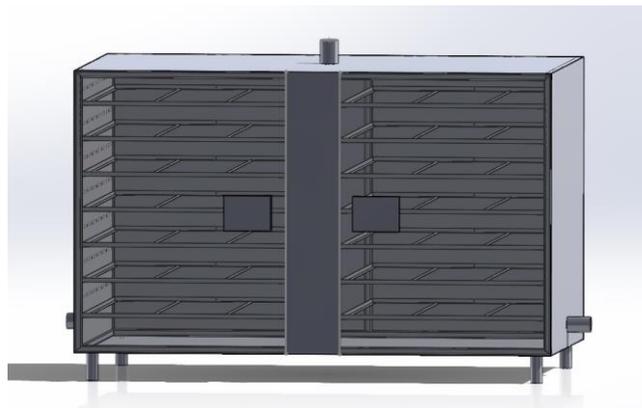
1. *Design for Manufacturing*
2. *Design for Simulation*

### 3.3.1 *Design for Manufacturing*

*Design for manufacturing* adalah tahapan pembuatan desain yang disesuaikan dengan kebutuhan untuk di manufaktur. Hal ini bertujuan supaya dalam proses manufaktur nantinya menjadi dimudahkan karena memiliki desain yang sesuai. Maka dari itu, pada tahapan ini *wall* atau semua bagian di desain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-2 dan Gambar 3-3 sebagai berikut.



Gambar 3-2 Desain *Heat Exchanger*

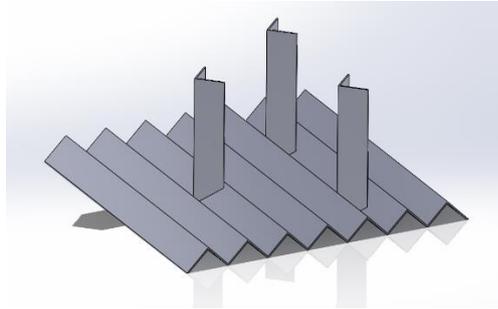


Gambar 3-3 Desain Ruang Pengering

### 3.3.2 *Design for Simulation*

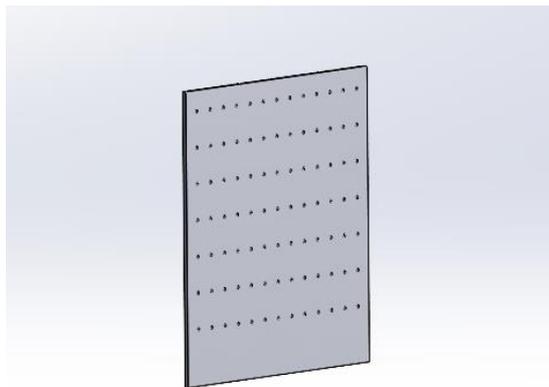
*Design for simulation* adalah tahapan lanjutan dari *design for manufacturing* dimana desain dari manufaktur tersebut disederhanakan untuk tujuan dilakukan simulasi. Bagian-bagian yang tidak berpengaruh dalam proses simulasi akan dihilangkan agar *calculation time* dari simulasi menjadi lebih

rendah dan juga pada tahapan ini akan diberikan *domain fluida*. Pada bagian *heat exchanger*, *wall* yang dipertahankan untuk simulasi adalah bagian *heat wall* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-4 karena bagian inilah yang akan mengalami perpindahan kalor dengan udara.



Gambar 3-4 *Heat Wall*

Pada bagian ruang pengering tidak ada *wall* yang dipertahankan karena tidak berpengaruh pada proses simulasi. Hal ini termasuk pada *partition wall* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-5 sebagai berikut.



Gambar 3-5 *Partition Wall*

Pada *design for simulation* di alat pengering ini desain dapat dibuat menjadi setengah bagian karena geometrinya yang simetris, sehingga aliran dapat dibuat menjadi separuh *domain* atau disebut dengan *symmetric boundary condition* (SimScale, 2023).

### **3.4 Proses Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)**

Proses simulasi perpindahan kalor dengan metode *computational fluid dynamics* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Ansys Student R1 2023*. Tahapan yang dilakukan pada proses ini diantaranya:

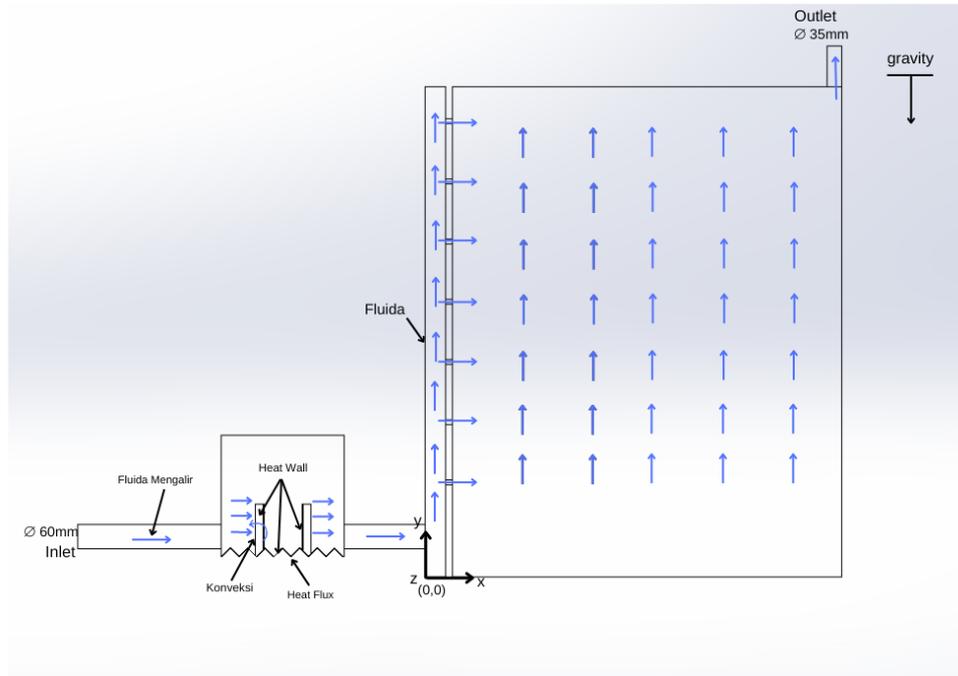
1. Pendefinisian Model
2. *Pre-processing*
3. *Processing*
4. *Post-processing*

#### **3.4.1 Pendefinisian Model**

Pendefinisian model adalah sebuah penentuan sebelum memasuki proses simulasi dengan tujuan agar saat memasuki proses simulasi menjadi lebih mudah. Hal-hal yang ditentukan meliputi seperti pendefinisian skematik geometri, pendefinisian *properties* material, pendefinisian karakteristik fluida, pendefinisian *governing equation*, dan pendefinisian *boundary condition*.

##### **3.4.1.1 Pendefinisian Skematik Geometri**

Pendefinisian ini yaitu menentukan bagaimana geometri yang akan disimulasi bekerja, seperti fenomena apa saja yang terjadi, penentuan *wall* untuk nanti di *mesh* dan *boundary condition*, penentuan arah gravitasi, dan penentuan titik nol untuk memudahkan nantinya dalam distribusi temperatur. Pendefinisian skematik geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-6 sebagai berikut.



Gambar 3-6 Skematik Geometri

### 3.4.1.2 Pendefinisian *Properties Material*

*Properties* yang akan digunakan pada material *heat wall* adalah *low carbon steel*, sedangkan pada fluida adalah udara dengan temperatur 27,00 °C. Nilai dari *properties low carbon steel* yang diambil dari MatWeb (t.t.) dan udara dari Welty dkk. (2007) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3-3 sebagai berikut.

Tabel 3-3 *Properties Low Carbon Steel dan Udara*

<i>Properties</i>	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/(Kg.K))	$k$ (W/(m.K))	$\mu$ (Kg/(m.s))	$Pr$
<i>Low Carbon Steel</i>	2850	450	25,3	-	-
Udara	1,1769	1006,3	0,02624	1,8464 x 10 <sup>-5</sup>	0,708

### 3.4.1.3 Pendefinisian Karakteristik Fluida

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada subbab (2.2.5.1) mengenai karakteristik fluida, beberapa hal yang harus dikarakterisasi sebagai berikut.

### 1. Kecepatan Aliran

Kecepatan udara menggunakan data dari blower yang digunakan yaitu berjenis *blower* sentrifugal, dimana *blower* ini menghasilkan 3.000-3.600 RPM dan memiliki diameter *blade* sebesar 15,00 cm. Karena 1 *revolution* sama dengan  $\pi d$  maka dapat dikonversi dari RPM menjadi m/s seperti pada persamaan (3.1) sebagai berikut.

$$v = \frac{\pi d N}{60} \quad (3.1)$$

Dimana  $v$  adalah kecepatan dalam m/s,  $\pi$  adalah ketetapan yaitu 3,14 kemudian  $N$  adalah nilai RPM dimana diambil nilai rata-rata yaitu 3.300 RPM, dan  $d$  adalah diameter *blade* dalam m. Maka dari persamaan (3.1) didapatkan kecepatan udara sebagai berikut.

$$v = \frac{3,14 \times 0,15 \times 3300}{60} \quad (3.2)$$

$$v = 25,905 \text{ m/s} \approx 25,91 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

Selanjutnya dari nilai kecepatan pada persamaan (3.3) maka akan divariasikan sebagai data pembanding yaitu kecepatan sebesar 15,00 m/s dan 5,00 m/s.

### 2. Sifat Aliran

Sifat aliran udara pada penelitian ini berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan *Mach number* pada persamaan (2.4) didapatkan nilai diseluruh variasi kecepatan yaitu kurang dari 0,30 yang menunjukkan sifat aliran *incompressible*. Tabel sifat aliran diseluruh variasi kecepatan ditunjukkan pada Tabel 3-4 sebagai berikut.

Tabel 3-4 Sifat Aliran

No	Kecepatan (m/s)	<i>Ma</i>	Sifat Aliran
1.	25,91	0,07	<i>Incompressible</i>
2.	15,00	0,04	
3.	5,00	0,01	

### 3. Jenis Aliran

Jenis aliran udara pada penelitian ini berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan *Reynolds number* pada persamaan (2.5), dimana diameter aliran udara sebesar 0,06 m (seperti pada Gambar 3-6), sedangkan untuk

densitas dan viskositas udara seperti pada Tabel 3-3. Didapatkan nilai diseluruh variasi kecepatan yaitu lebih dari 10.000 yang menunjukkan jenis aliran *turbulen*. Tabel jenis aliran diseluruh variasi kecepatan ditunjukkan pada Tabel 3-5 sebagai berikut.

Tabel 3-5 Jenis Aliran

No	Kecepatan (m/s)	$Re$	Jenis Aliran
1.	25,91	99.090,59	<i>Turbulen</i>
2.	15,00	57.366,23	
3.	5,00	19.122,08	

#### 4. *Velocity Profile*

*Velocity profile* atau profil kecepatan pada penelitian ini berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (2.7) karena jenis alirannya *turbulen*, didapatkan panjang untuk mencapai kondisi parabolik ( $Lh$ ) lebih besar dari panjang realita *inlet* ( $Li$ ), maka dari itu profil kecepatannya adalah merata. Tabel profil kecepatan diseluruh variasi kecepatan ditunjukkan pada Tabel 3-6 sebagai berikut.

Tabel 3-6 Profil Kecepatan

No	Kecepatan (m/s)	$Re$	$Li$ (m)	$Lh$ (m)	<i>Velocity Profile</i>
1.	25,91	99.090,59	0,35	1,45	Merata
2.	15,00	57.366,23		1,26	
3.	5,00	19.122,08		0,96	

#### 3.4.1.4 Pendefinisian *Governing Equation*

Pada simulasi perpindahan kalor di alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini mengalami beberapa kondisi perilaku yang terjadi didalam sistemnya, seperti fenomena aliran fluida yang mengalir yang melibatkan persamaan momentum dan kontinuitas dan juga perpindahan kalor yang melibatkan persamaan konveksi paksa.

##### 1. Persamaan Momentum

Simulasi ini dimana sifat aliran adalah *incompressible*, maka persamaan matematis dari persamaan momentum menurut ANSYS (2013) adalah menggunakan persamaan dari *Navier-Stokes* sebagai berikut.

$$\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.4)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas dalam  $\text{Kg/m}^3$ ,  $v$  adalah kecepatan dalam  $\text{m/s}$ ,  $p$  adalah tekanan dalam  $\text{Pa}$ ,  $\vec{\tau}$  adalah *stress tensor*,  $g$  adalah gravitasi dalam  $\text{m/s}^2$ , dan  $F$  adalah gaya dalam  $\text{N}$ . Dari persamaan (3.4) dapat diturunkan fungsi kecepatan, tekanan, percepatan gravitasi, dan gaya terhadap posisi. Dimana di simulasi ini adalah aliran *three-dimensional* sehingga turunannya terhadap sumbu x, sumbu y, dan sumbu z berturut-turut adalah sebagai berikut.

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_x + \vec{F}_x \quad (3.5)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_y + \vec{F}_y \quad (3.6)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho \vec{g}_z + \vec{F}_z \quad (3.7)$$

## 2. Persamaan Kontinuitas

Simulasi ini dimana sifat aliran adalah *incompressible*, maka persamaan matematis dari persamaan kontinuitas menurut Welty dkk. (2007) adalah sebagai berikut.

$$\nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.8)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas dalam  $\text{Kg/m}^3$  dan  $v$  adalah kecepatan dalam  $\text{m/s}$ . Dari persamaan (3.8) dapat diturunkan fungsi kecepatan terhadap posisi, dimana di simulasi ini adalah aliran *three-dimensional* sehingga turunannya adalah sebagai berikut.

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.9)$$

## 3. Persamaan Konveksi Paksa

Pada simulasi ini terjadi konveksi paksa dimana udara mengalir dan mengalami kontak dengan *heat wall* sebagai sumber panas, sehingga terjadi fenomena konveksi paksa. Persamaan matematis yang sesuai dari fenomena ini adalah persamaan dari *Newton's law of cooling* dimana dari persamaan (2.1) dapat diterapkan dalam *heat flux* sebagai berikut (Çengel dkk., 2017).

$$q = h_c \Delta T \quad (3.10)$$

Dimana  $q$  adalah *heat flux* dalam  $\text{W/m}^2$ ,  $h_c$  adalah *heat transfer coefficient* dalam  $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , dan  $T$  adalah temperatur dalam  $\text{K}$ . Terdapat juga persamaan

dari konservasi energi dimana menjelaskan temperatur terhadap waktu dan juga terhadap posisi *three-dimensional* seperti berikut ini.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p) \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi + \dot{q} \quad (3.11)$$

Dimana  $T$  adalah temperatur dalam K,  $\rho$  adalah densitas dalam  $\text{Kg/m}^3$ ,  $C_p$  adalah *specific heat* dalam  $\text{J}/(\text{Kg.K})$ ,  $v$  adalah kecepatan dalam  $\text{m/s}$ ,  $k$  adalah *thermal conductivity* dalam  $\text{W}/(\text{m.K})$ ,  $\mu \Phi$  adalah dissipasi viskositas, dan  $\dot{q}$  sumber panas tambahan dimana pada fenomena simulasi ini adalah nilainya nol.

### 3.4.1.5 Pendefinisian *Boundary Condition*

Pada Gambar 3-6 dijelaskan bahwa pendefinisian *boundary condition* pada alat pengering ini memiliki empat *boundary*, yaitu *inlet*, *outlet*, *heatwall*, dan *fluid*. Dari pendefinisian *governing equation* yang dijelaskan pada subbab (3.4.1.4) maka didapatkan data apa saja yang dibutuhkan oleh keempat *boundary condition* untuk proses simulasi nanti.

#### 1. *Inlet*

Tipe *boundary condition* yang digunakan adalah tipe *velocity-inlet*, sehingga data yang dibutuhkan adalah kecepatan dan temperatur udara saat masuk ke *inlet*, seperti yang dijelaskan pada Tabel 3-7 sebagai berikut.

Tabel 3-7 Data *Inlet*

Kecepatan (m/s)	Temperatur (°C)
25,91	27,00
15,00	
5,00	

#### 2. *Outlet*

Tipe *boundary condition* yang digunakan adalah tipe *pressure-outlet*, sehingga data yang dibutuhkan adalah hanya tekanan, seperti yang dijelaskan pada Tabel 3-8 sebagai berikut.

Tabel 3-8 Data *Outlet*

Kecepatan (m/s)	Tekanan (Pa)
25,91	101.325
15,00	
5,00	

### 3. Heat Wall

Berdasarkan yang sudah dijelaskan pada subbab *boundary condition* (2.2.5.4). Kondisi *boundary condition* yang digunakan pada *heat wall* ini adalah kondisi *Neumann* dan kondisi *Robin*, dimana data yang dibutuhkan adalah nilai dari *heat flux* dan nilai dari *heat transfer coefficient*.

Sehingga diperlukan perhitungan untuk mencari nilai *heat flux* tersebut yang mengacu dari penelitian lain. Dari data eksperimen yang diambil dari Pambudi (2017), didapatkan data dari nilai kalor seperti pada Tabel 3-9 sebagai berikut.

Tabel 3-9 Data Eksperimen Nilai Kalor Gas LPG

Bukaan Katup	$q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	HV (kJ/Kg)	$\rho_{gas\ 0\ ^\circ C\ 1\ atm}$ (Kg/m <sup>3</sup> )
1/2	$1,667 \times 10^{-5}$	17.636,32	1,882
1/4		17.907,38	
1/8		13.023,45	

Data ini akan diolah untuk mendapatkan nilai dari *heat flux*. Data pertama atau bukaan 1/2 katup akan menjadi data acuan bersama kecepatan 25,91 m/s yang akan dibandingkan dengan proses pengujian dan variasi nantinya. Pada alat pengering, diameter dari *burner* sebesar 9,00 cm atau luas permukaannya (*A*) dalam meter adalah  $6,359 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>. Maka dengan data ini dapat dihitung laju aliran massa fluidanya seperti pada perhitungan berikut ini.

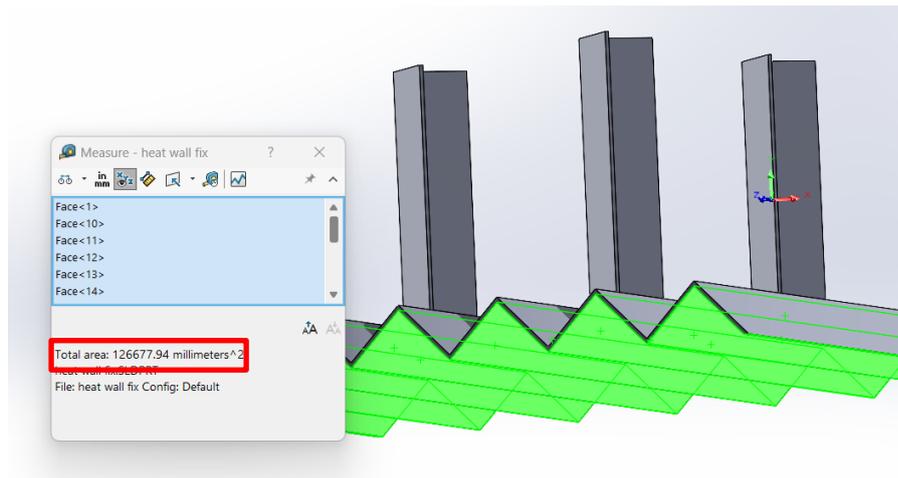
$$q_m = q_v \times \rho \quad (3.12)$$

Dimana  $q_m$  adalah laju aliran massa fluida dalam Kg/s,  $q_v$  adalah laju aliran volume fluida dalam m<sup>3</sup>/s, dan  $\rho$  adalah densitas dalam Kg/m<sup>3</sup>. Setelah mendapatkan nilai dari laju aliran massa, maka nilai tersebut dapat dimasukkan ke perhitungan *heat flux* seperti pada persamaan (3.13) sebagai berikut.

$$q = \frac{q_m \times HV}{A} \quad (3.13)$$

Dimana  $q$  adalah *heat flux* dalam kJ/(m<sup>2</sup>.s) yang kemudian nilainya dikali 1.000 agar terkonversi dalam W/m<sup>2</sup>,  $q_m$  adalah laju aliran massa fluida dalam Kg/s, *HV* adalah nilai kalor dalam kJ/Kg, dan *A* adalah luas permukaan *burner* dalam m<sup>2</sup>. Namun, nilai *heat flux* tersebut merupakan nilai *heat flux* sempurna yang

dihasilkan *burner*. Sehingga perlu dilakukan perhitungan penyesuaian agar nilai *heat flux* terbagi merata ke luas permukaan *heat wall* sebagai penghasil panas. Perhitungan tersebut menggunakan perbandingan antara luas permukaan *burner* dengan luas permukaan *heat wall* yang terkontak dengan *burner* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-7 yang kemudian dibagi dengan nilai *heat flux* sempurna. Hasil dari perhitungan nilai *heat flux* seperti pada Tabel 3-10 sebagai berikut.



Gambar 3-7 Luas Permukaan *Heat Wall* Kontak dengan *Burner*

Tabel 3-10 Nilai *Heat Flux*

Bukaan Katup	$q_m$ (Kg/s)	$q_{sempurna}$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{merata}$ (W/m <sup>2</sup> )
1/2	$3,137 \times 10^{-5}$	87.017,88	4.367,79
1/4		88.355,30	4.434,92
1/8		64.257,91	3.225,38

Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai *heat transfer coefficient*. Dalam mencari nilai *heat transfer coefficient* dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan dari persamaan (2.2) menjadi sebagai berikut (Ghahfarokhi dkk., 2019).

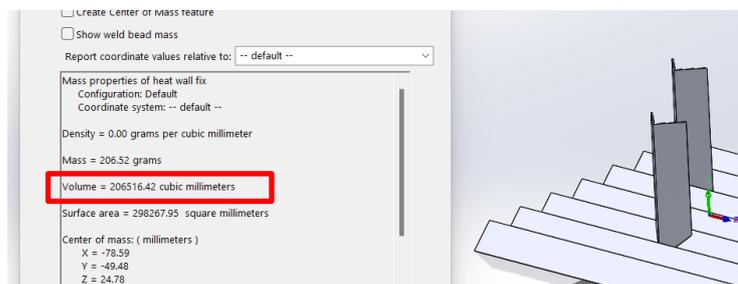
$$h_c = \frac{(Nu \times k)}{L_c} \quad (3.14)$$

Dimana  $h_c$  adalah *heat transfer coefficient* dalam W/(m<sup>2</sup>.K),  $Nu$  adalah *Nusselt number*,  $k$  adalah *thermal conductivity* dalam W/(m.K), dan  $L_c$  adalah panjang karakteristik dalam m. Untuk mendapatkan nilai dari *Nusselt number* dapat

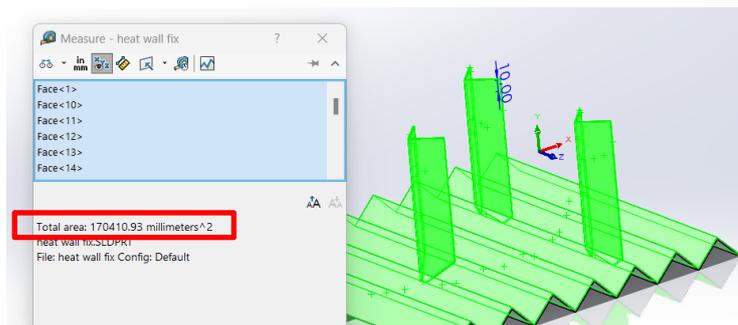
menggunakan metode *Dittus-Boelter* dari persamaan berikut ini (Winterton, 1998).

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^n \quad (3.15)$$

Dimana *Nu* adalah *Nusselt number*, *Re* adalah *Reynold number*, dan *Pr* adalah *Prandtl number*, dimana *Reynold number* didapatkan dari Tabel 3-5, dan *Prandtl number* didapatkan dari Tabel 3-3. Untuk *n* memiliki nilai sebesar 0,40 untuk fluida yang dipanaskan. Sedangkan untuk mencari nilai panjang karakteristik (*L<sub>c</sub>*) adalah dengan cara membagi volume dengan luas permukaan dari *heat wall* yang mengalami konveksi, dimana untuk volume dan luas permukaannya seperti pada Gambar 3-8 dan Gambar 3-9 sebagai berikut.



Gambar 3-8 Volume Heat Wall



Gambar 3-9 Luas Permukaan Konveksi Heat Wall

Hasil dari perhitungan *heat transfer coefficient* pada persamaan (3.14) dengan variasi kecepatan seperti yang terdapat pada Tabel 3-11 berikut ini.

Tabel 3-11 Nilai *Heat Transfer Coefficient*

Kecepatan (m/s)	<i>Re</i>	<i>L<sub>c</sub></i> (m)	<i>Nu</i>	<i>h<sub>c</sub></i> (W/(m <sup>2</sup> .K))
25,91	99.090,59	1,21x10 <sup>-3</sup>	198,87	4.306,00
15,00	57.366,23		128,43	2.780,82
5,00	19.122,08		53,33	1.154,72

#### 4. Fluid

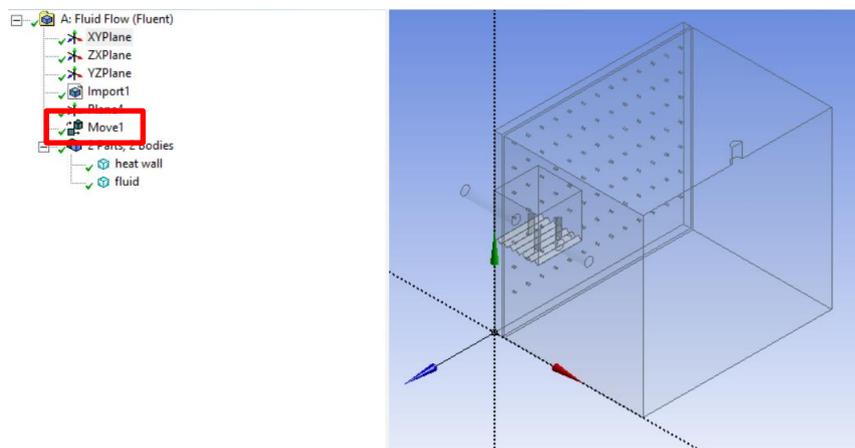
Aliran udara tersebut akan diberi *boundary condition* yaitu *stationary wall* dan *no-slip condition*. Hal ini dikarenakan fluida yang bergerak di dekat dinding memiliki kecepatan yang rendah mendekati nol karena memiliki gesekan yang paling besar.

### 3.4.2 Pre-processing

Tahapan awal dari simulasi ini setelah pendefinisian model adalah *pre-processing*. Dimana pada proses ini mulai menentukan geometri dan *mesh* sesuai dengan pendefinisian model.

#### 1. Geometri

Desain yang telah dibuat di perangkat lunak *Solidworks 2021* kemudian di-*import* ke *Ansys*. Setelah di-*import* kemudian melakukan *edit geometry* menggunakan *Design Modeller* untuk mendefinisikan sesuai dengan pendefinisian model. Hal-hal yang didefinisikan adalah pemindahan titik nol dari *default* menjadi sesuai yang didefinisikan pada Gambar 3-6. Geometri yang di-*import* dan pemindahan titik nol sesuai pendefinisian model seperti pada Gambar 3-10 sebagai berikut.

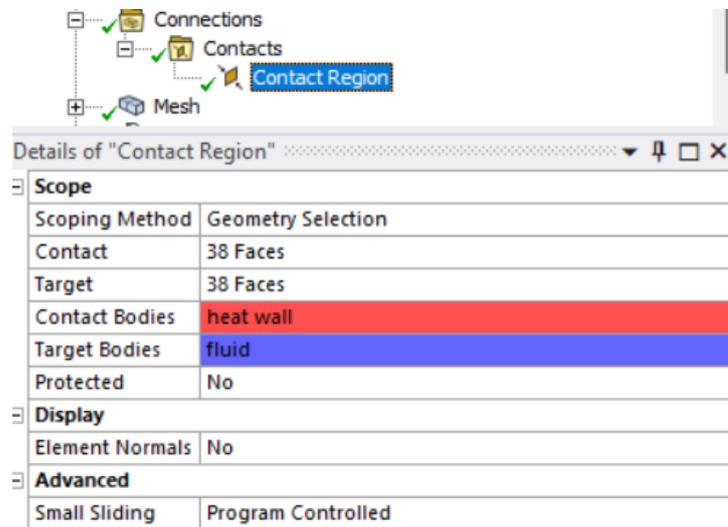


Gambar 3-10 Pendefinisian Titik Nol Geometri

#### 2. Mesh

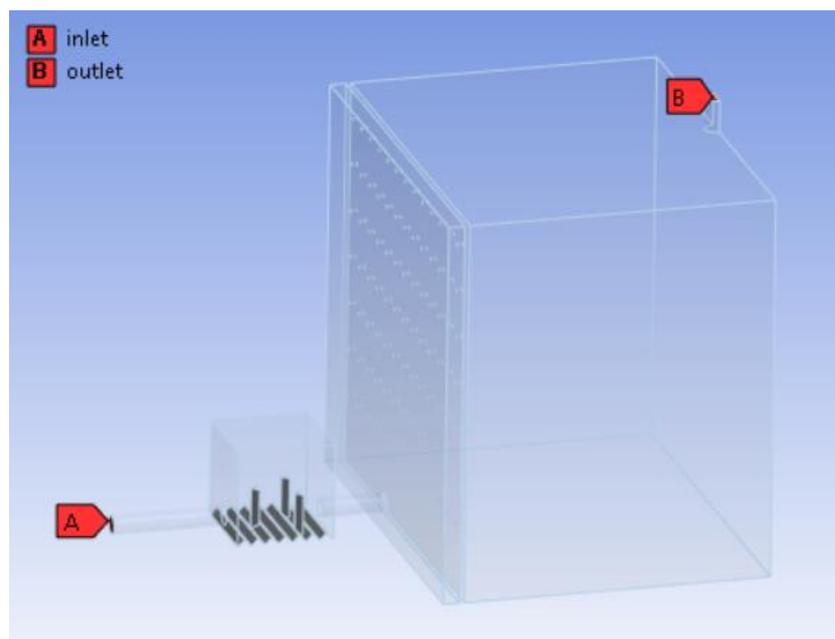
Pada tahapan ini hal-hal yang dilakukan adalah dimulai dari pendefinisian *interface* antara permukaan *heat wall* dan fluida yang bertemu agar dapat terjadi

perpindahan kalor. Karena kalor berpindah dari *heat wall* ke fluida, maka *heat wall* dijadikan sebagai *source* atau *contact* sedangkan fluida sebagai *target*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-11 sebagai berikut.



Gambar 3-11 *Interface Heat Wall dan Fluida*

Selanjutnya adalah pendefinisian bagian mana yang *inlet* dan *outlet* sesuai dengan Gambar 3-6, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-12 sebagai berikut.



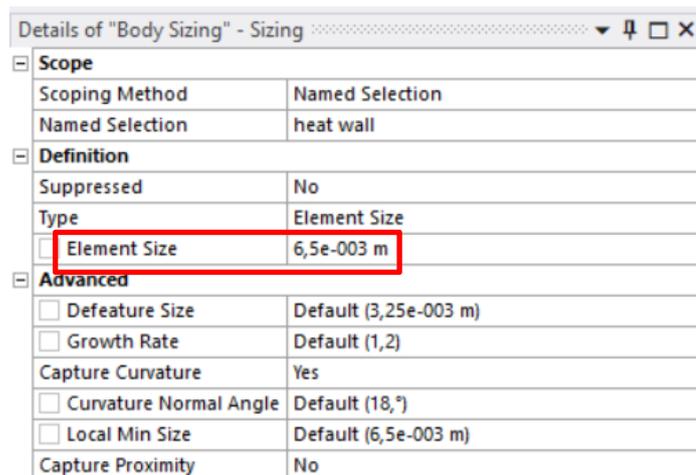
Gambar 3-12 *Pendefinisian Inlet dan Outlet*

Kemudian tahapan berikutnya adalah melakukan *meshing* dengan mempertimbangkan ukuran geometri yang besar dan juga *mesh quality* yaitu *orthogonal quality* dan *skewness quality*. Maka *meshing* dilakukan dengan membagi tiga *sizing* menjadi *global sizing*, *body sizing*, dan *face sizing*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-13 sebagai berikut.

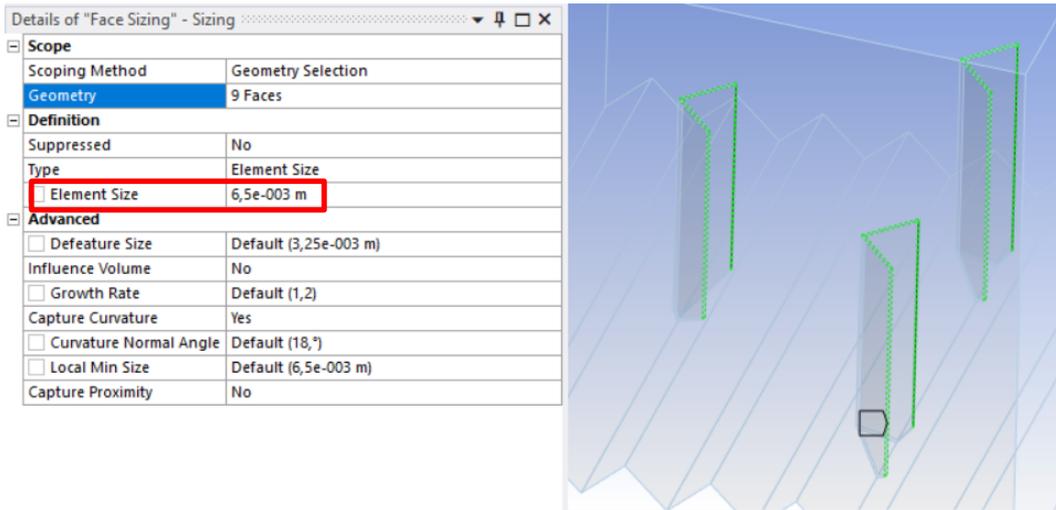


Gambar 3-13 *Mesh Sizing*

*Body sizing* dan *face sizing* dilakukan karena untuk mengatasi permasalahan *mesh quality* dimana *orthogonal quality* berada dibawah 0,01 pada bagian-bagian tertentu. *Body sizing* dilakukan pada *heat wall* seperti pada Gambar 3-14 dengan *element size* sebesar 0,0065 m dan *face sizing* pada permukaan seperti Gambar 3-15 dengan *element size* sebesar 0,0065 m.



Gambar 3-14 *Body Sizing*



Gambar 3-15 Face Sizing

Hasilnya adalah dengan menggunakan tiga *sizing* dimana *global sizing* memiliki *element size* sebesar 0,75 m, maka *orthogonal quality* yang sebelumnya kurang dari 0,01 menjadi 0,015735 dan dengan rata-rata 0,73443. Sedangkan untuk *skewness quality* memiliki rata-rata sebesar 0,26434. Hasil ini menurut Gambar 2-22 adalah hasil yang *very good* untuk *orthogonal quality* dan *skewness quality*. Hasil dari *orthogonal* dan *skewness quality* ditunjukkan pada Gambar 3-16 dan 3-17 berturut-turut sebagai berikut.

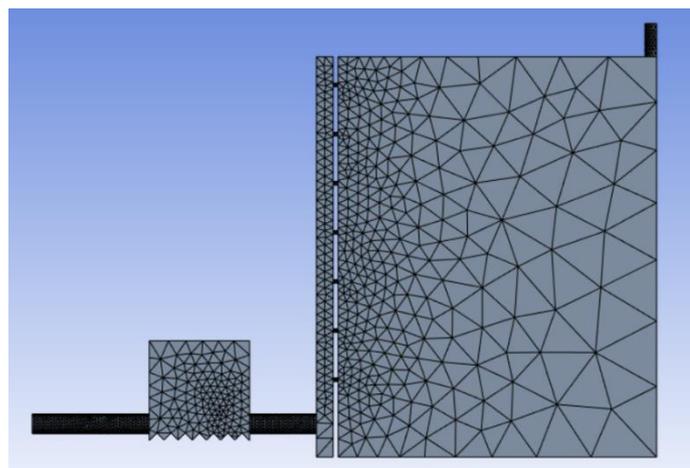
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1,5735e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99603
<input type="checkbox"/> Average	0,73443
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,16862
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	100895
<input type="checkbox"/> Elements	498328
Show Detailed Statistics	No

Gambar 3-16 Orthogonal Quality

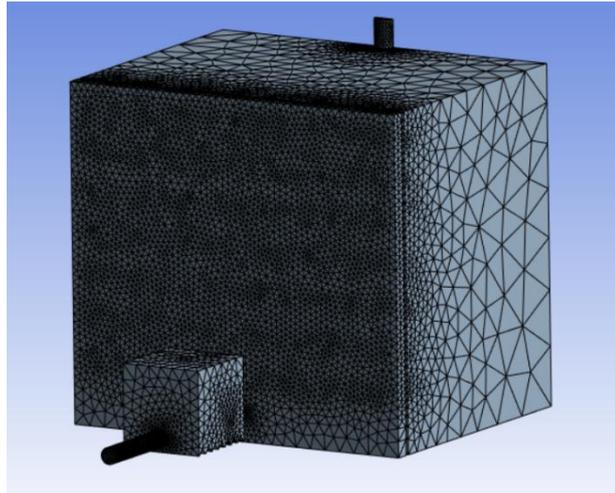
+	<b>Sizing</b>	
-	<b>Quality</b>	
	Check Mesh Quality	Yes, Errors
	<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
	Smoothing	Medium
	<b>Mesh Metric</b>	Skewness
	<input type="checkbox"/> Min	3,5803e-005
	<input type="checkbox"/> Max	0,98426
	<input type="checkbox"/> Average	0,26434
	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,17001
+	<b>Inflation</b>	
+	<b>Advanced</b>	
-	<b>Statistics</b>	
	<input type="checkbox"/> Nodes	100895
	<input type="checkbox"/> Elements	498328
	Show Detailed Statistics	No

Gambar 3-17 *Skewness Quality*

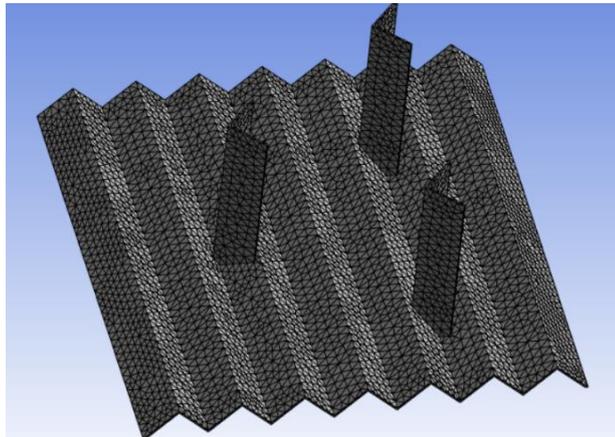
Dengan menggunakan tiga *sizing* ini menjadikan *nodes* berjumlah 100.895 dan *elements* berjumlah 498.328. Bentuk *mesh* dari pengaturan ini ditunjukkan pada Gambar 3-18, Gambar 3-19, Gambar 3-20, Gambar 3-21, dan Gambar 3-22 sebagai berikut.



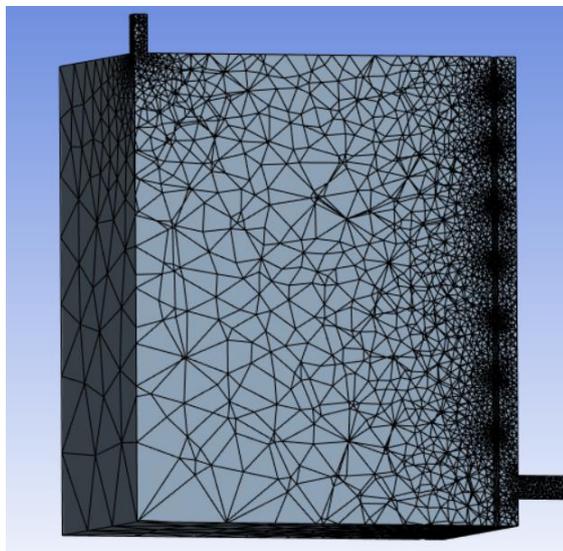
Gambar 3-18 *Detail Meshing 1*



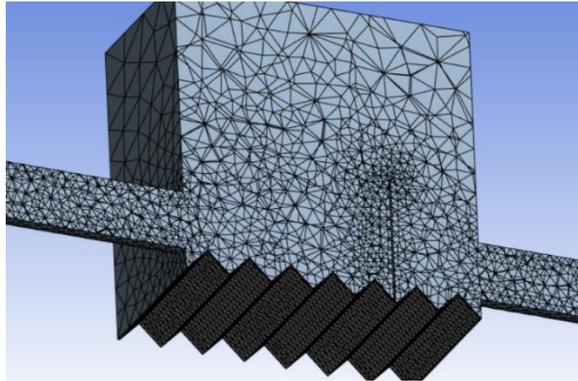
Gambar 3-19 *Detail Meshing 2*



Gambar 3-20 *Detail Meshing 3*



Gambar 3-21 *Detail Meshing 4*



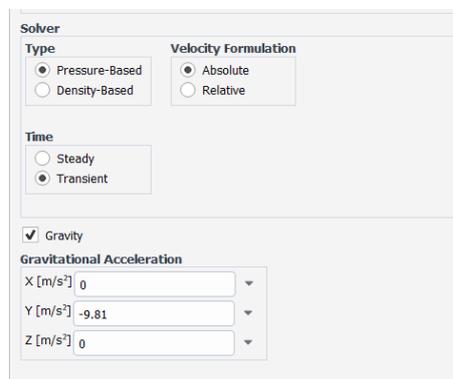
Gambar 3-22 *Detail Meshing 5*

### 3.4.3 *Processing*

Tahapan *processing* adalah tahapan memasukkan *setup* dan penentuan *solution* sebelum akhirnya simulasi dijalankan.

#### 1. *Solver*

Tipe *solver* yang digunakan adalah *pressured-based* karena sifat alirannya adalah *incompressible*. Kemudian *velocity formulation* yang digunakan adalah *absolute* karena memiliki jenis aliran *turbulen* dan kecepatannya yang tinggi. Waktu yang digunakan adalah *transient state time*, hal ini karena yang ingin diketahui adalah temperatur pada waktu tertentu. *Input solver* pada *ansys* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-23 sebagai berikut.

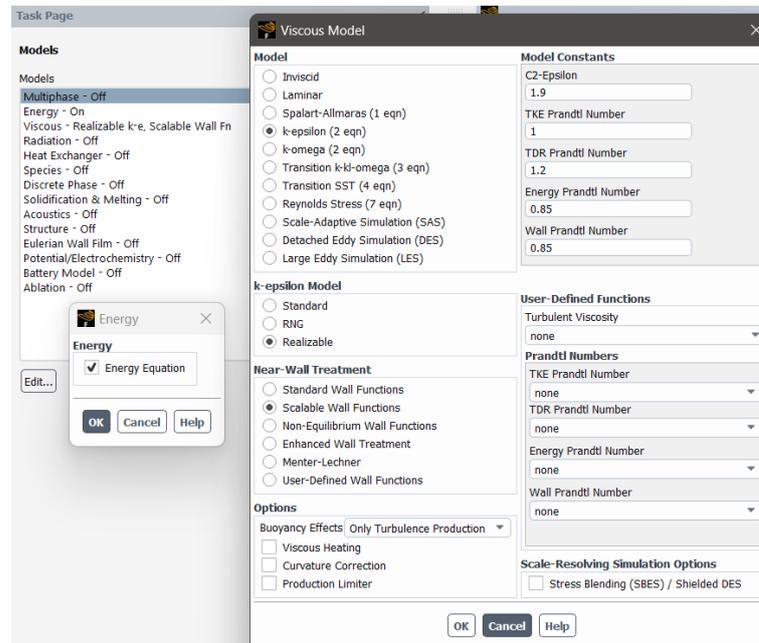


Gambar 3-23 *Input Solver*

#### 2. *Models*

Pada simulasi ini terjadi perpindahan kalor maka *energy equation* diaktifkan, kemudian karena jenis alirannya adalah *turbulen* dan alirannya adalah

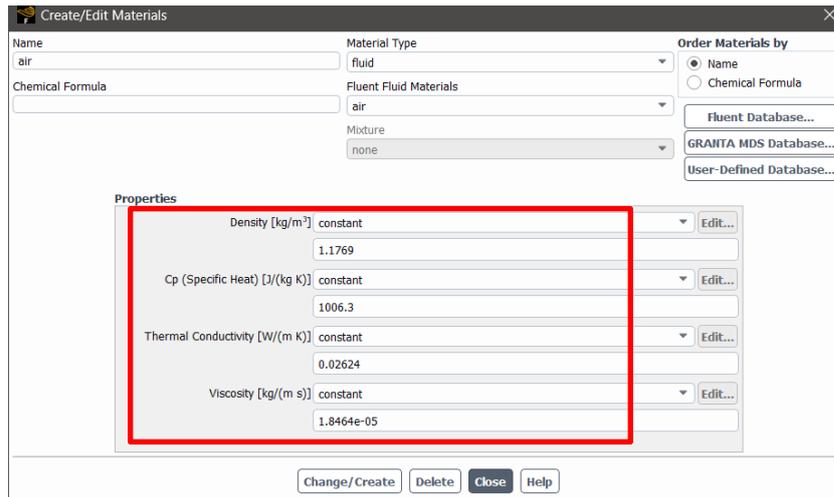
*free shear layer* atau terdapat aliran fluida yang memiliki kecepatan yang berbeda dikarenakan ada objek, maka *model* yang digunakan adalah *k-epsilon*. Kemudian digunakan *realizable* dan *scalable wall function* karena *realizable* dapat mengatasi kesalahan dalam pemodelan, sedangkan *scalable wall function* dapat mengatasi lapisan batas yang sangat tipis tanpa mempengaruhi akurasi. Hasil tersebut ditunjukkan pada Gambar 3-24 sebagai berikut.



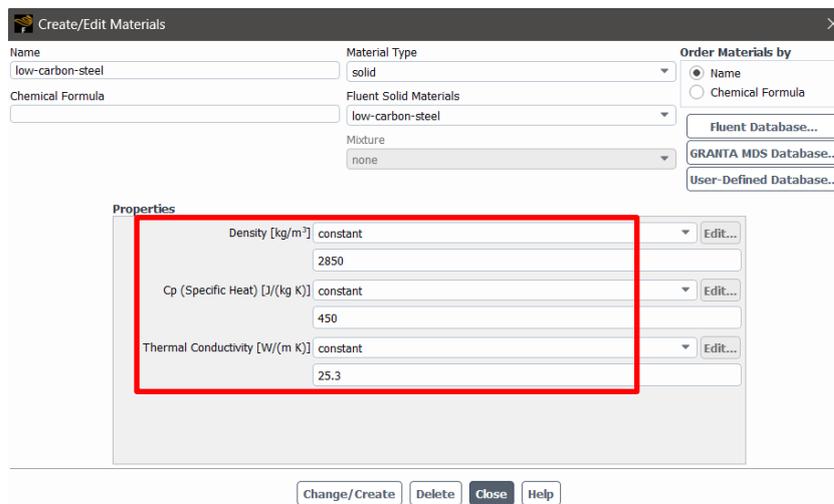
Gambar 3-24 *Input Models*

### 3. *Materials*

*Input* dari material baik *low carbon steel* dan udara disesuaikan dengan yang sudah ditentukan pada Tabel 3-3. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3-25 dan Gambar 3-26 sebagai berikut.



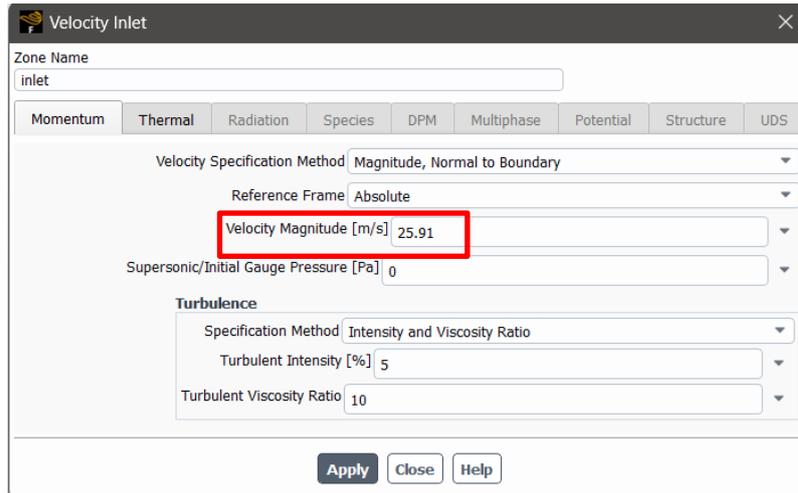
Gambar 3-25 *Input Material Udara*



Gambar 3-26 *Input Material Low Carbon Steel*

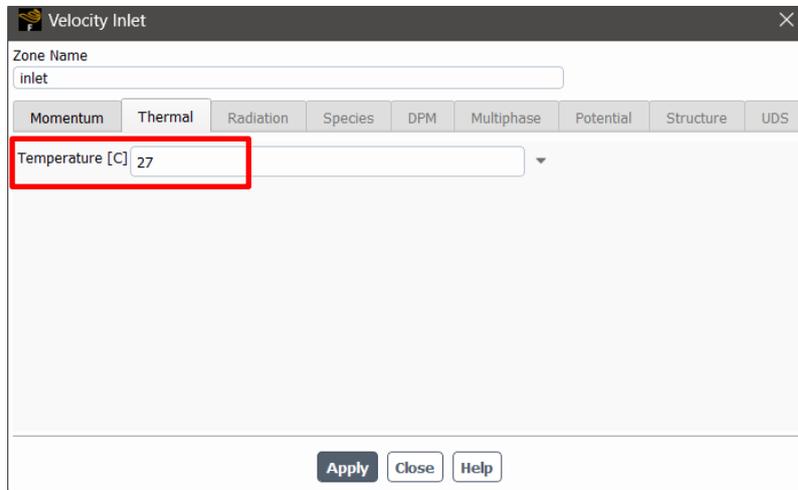
#### 4. *Boundary Condition*

*Input* pada *boundary condition* disesuaikan dengan nilai yang sudah didapatkan di subbab (3.4.1.5). Pada *boundary condition* untuk *inlet* seperti pada Tabel 3-7 yang ditunjukkan pada Gambar 3-27 dan Gambar 3-28 sebagai berikut.



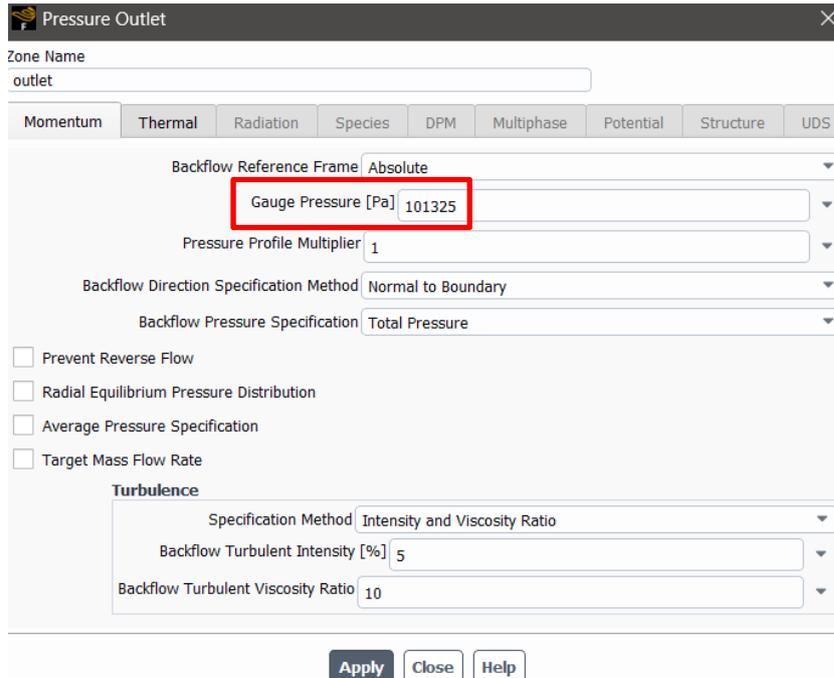
Gambar 3-27 *Input Velocity Inlet*

Setelah itu masukkan juga nilai kecepatan dengan variasi lainnya yaitu 5,00 m/s dan 15,00 m/s.



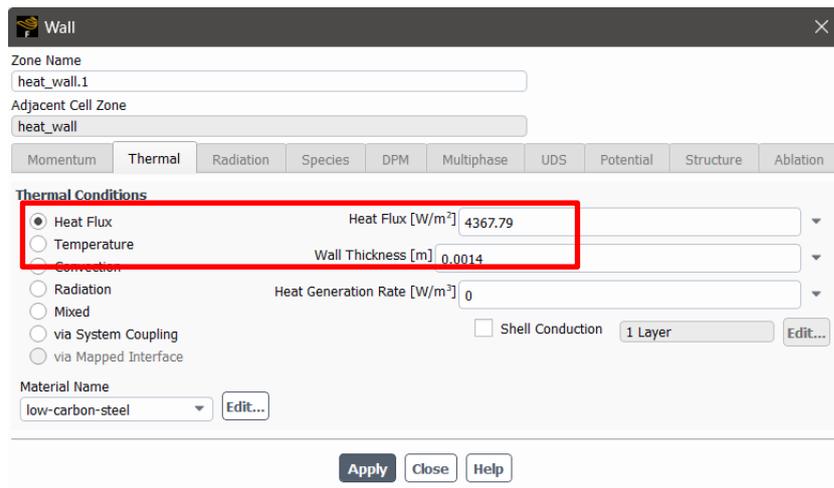
Gambar 3-28 *Input Temperature Inlet*

Pada *boundary condition* untuk *outlet* seperti pada Tabel 3-8 yang ditunjukkan pada Gambar 3-29 sebagai berikut.



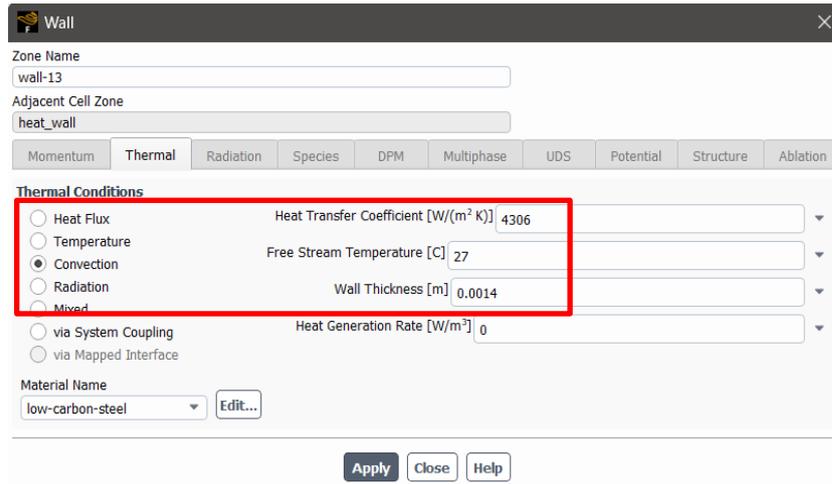
Gambar 3-29 *Input Pressure Outlet*

Pada *boundary condition* untuk *heat wall* sebagai sumber panas dengan nilai *heat flux* didapatkan dari Tabel 3-10 yang ditunjukkan pada Gambar 3-30 sebagai berikut.



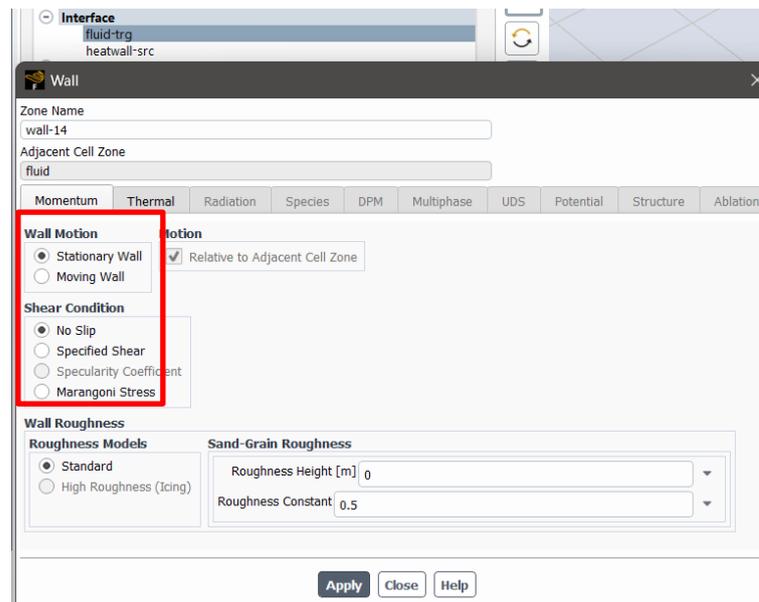
Gambar 3-30 *Input Nilai Heat Flux*

Masukkan juga nilai *heat flux* untuk variasi lainnya yaitu variasi bukaan 1/4 dan 1/8 katup. Sedangkan pada *boundary condition* untuk *heat wall* sebagai dinding yang mengkonveksi udara didapatkan nilai *heat transfer coefficient* dari Tabel 3-11 yang ditunjukkan pada Gambar 3-31 sebagai berikut.



Gambar 3-31 *Input Nilai Heat Transfer Coefficient*

Masukkan juga nilai *heat transfer coefficient* untuk variasi lainnya yaitu berdasarkan kecepatan 5,00 dan 15,00 m/s. *Boundary condition* untuk udara seperti yang sudah dijelaskan pada subbab (3.4.1.5) tentang fluida udara, maka hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3-32 sebagai berikut.

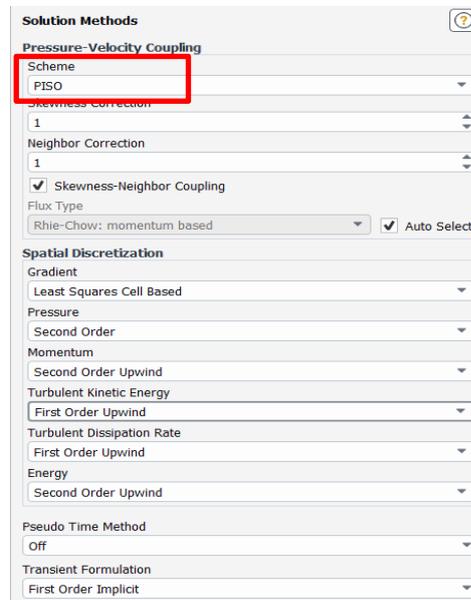


Gambar 3-32 *Input Fluida*

## 5. Solution

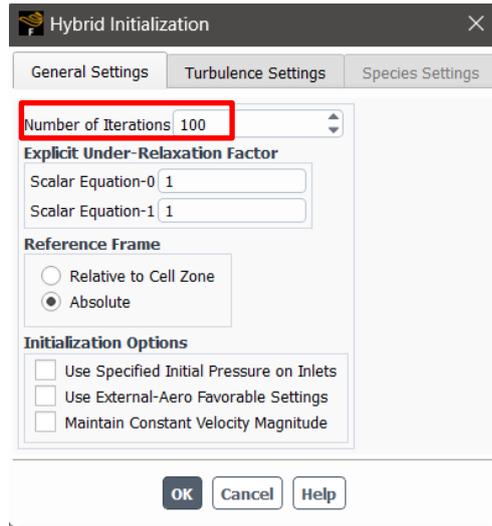
*Solution* yang digunakan disesuaikan dengan simulasi yang sedang dijalankan. *Solution methods* yang digunakan adalah PISO dimana metode ini dapat memecahkan persamaan kontinuitas, momentum, dan energi dengan

pedekatan langkah-langkahnya terpisah atau *segregated* seperti SIMPLE, namun metode ini lebih cocok untuk aliran *turbulen* dan lebih kompleks. *Solution method* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-33 sebagai berikut.

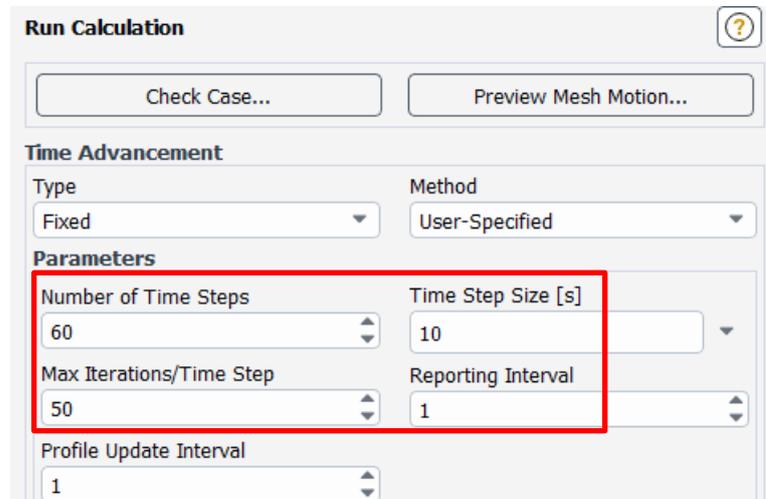


Gambar 3-33 *Input Solution Methods*

Dalam menjalankan simulasi nantinya, *initialization* atau proses mengatur nilai di awal dari variabel-variabel dalam model yang akan disimulasikan adalah menggunakan tipe *hybrid* dengan *number of iterations* berjumlah 100 agar mendapatkan hasil yang konvergen dan akurat. Sedangkan untuk proses kalkulasi, menggunakan *flowtime* selama 600 detik atau 10 menit. Dimana *number of time steps* berjumlah 60 dengan *time step size* selama 10 detik. Kemudian *total* dari iterasi juga sebanyak 3.000 iterasi. Hal tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 3-34 dan Gambar 3-35 sebagai berikut.



Gambar 3-34 *Input Initialization*



Gambar 3-35 *Input Calculation*

### 3.4.4 *Post-processing*

Pada *post-processing* tahapan yang dilakukan adalah mendapatkan hasil temperatur terhadap waktu, distribusi temperatur, dan vektor kecepatan dari simulasi perpindahan kalor. Hasil tersebut akan dijelaskan pada subbab 4.2 Hasil Simulasi CFD.

Tahapan lainnya pada *post-processing* ini adalah melihat apakah simulasi yang sudah dijalankan tersebut optimal terhadap waktu simulasi dan keakuratan atau tidak dengan *mesh dependency*. Karena seluruh variasi menggunakan *element sizing* yang sama, maka *mesh dependency* yang dilakukan menggunakan

acuan yaitu kecepatan 25,91 m/s dengan bukaan 1/2 katup dengan mengambil sampel posisi ditengah tray atau pada titik B. Dikarenakan memiliki tiga *element sizing* maka tiap-tiap *sizing* memiliki dua varian data yang kemudian dilakukan *cross join* tiap variasinya sehingga terdapat 8 data. Data yang didapatkan berdasarkan simulasi seperti pada Tabel 3-12 dan selisih datanya pada Tabel 3-13 sebagai berikut.

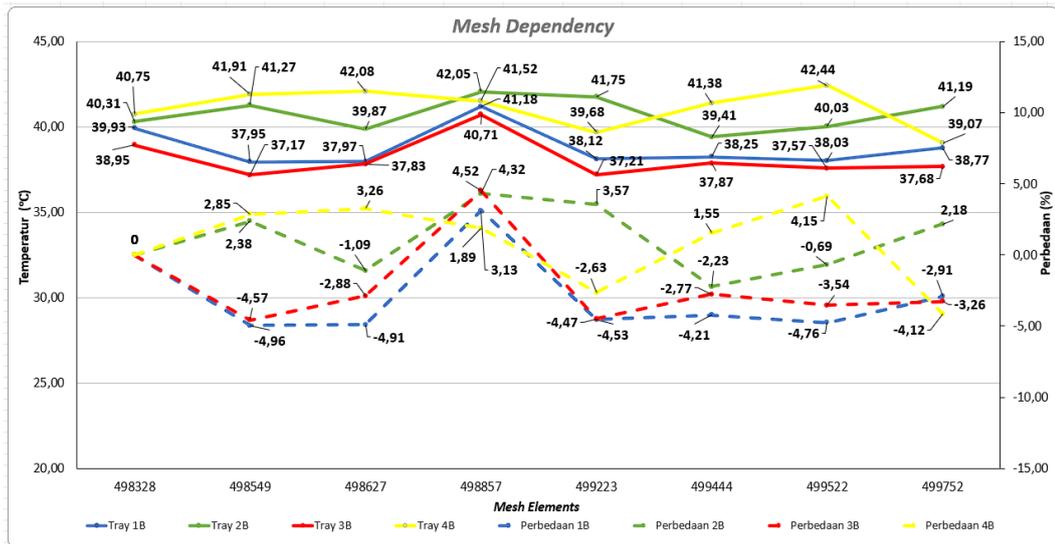
Tabel 3-12 Data Mesh Dependency

Data	Element Sizing (mm)			Mesh Elements	Temperature (°C)				Calculation Time (s)
	Global Sizing	Body Sizing	Face Sizing		1B	2B	3B	4B	
1	750,00	6,50	6,50	498.328	39,93	40,31	38,95	40,75	2526
2	750,00	6,50	6,45	498.549	37,95	41,27	37,17	41,91	2537
3	749,50	6,50	6,50	498.627	37,97	39,87	37,83	42,08	2538
4	749,50	6,50	6,45	498.857	41,18	42,05	40,71	41,52	2562
5	750,00	6,45	6,50	499.223	38,12	41,75	37,21	39,68	2587
6	750,00	6,45	6,45	499.444	38,25	39,41	37,87	41,38	2612
7	749,50	6,45	6,50	499.522	38,03	40,03	37,57	42,44	2635
8	749,50	6,45	6,45	499.752	38,77	41,19	37,68	39,07	2694

Tabel 3-13 Selisih Data Mesh Dependency

Data	Tray 1B (%)	Tray 2B (%)	Tray 3B (%)	Tray 4B (%)
1	0	0	0	0
2 ke 1	-4,96	2,38	-4,57	2,85
3 ke 1	-4,91	-1,09	-2,88	3,26
4 ke 1	3,13	4,32	4,52	1,89
5 ke 1	-4,53	3,57	-4,47	-2,63
6 ke 1	-4,21	-2,23	-2,77	1,55
7 ke 1	-4,76	-0,69	-3,54	4,15
8 ke 1	-2,91	2,18	-3,26	-4,12

Selanjutnya selisih data tersebut dibuat grafik seperti pada Gambar 3-36 sebagai berikut.



Gambar 3-36 Mesh Dependency

Berdasarkan grafik yang telah ditampilkan menurut persamaan (2.8), tidak ada perbedaan selisih data yang melebihi dari 5,00%. Sehingga data pertama atau sebagai data acuan dapat dikatakan optimal pada simulasi ini karena memiliki *calculation time* yang rendah namun sudah akurat.

### 3.5 Proses Pengujian

Proses pengujian dilakukan menggunakan sensor *thermocouple k-type probe wire* dan *digital thermo reader* sebagai pembacanya. *Thermocouple* diletakkan pada tengah-tengah tray 1, 2, 3, dan 4 atau posisi B seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-37 sebagai berikut.



Gambar 3-37 Instalasi Sensor *Thermocouple*

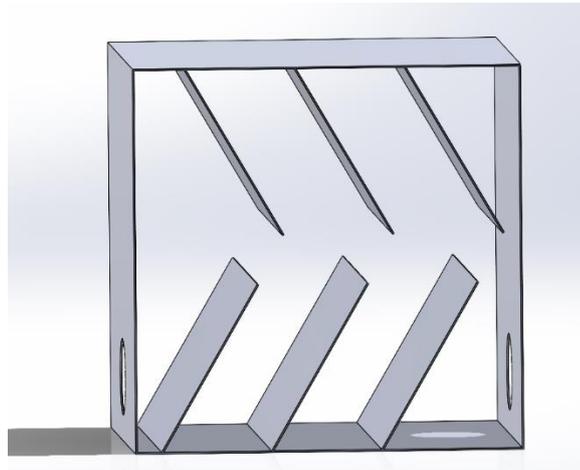
Setelah melakukan instalasi kemudian tahapan selanjutnya adalah menjalankan proses pengujian. Proses pengujian menggunakan kecepatan 25,91 m/s dan bukaan 1/2 katup. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali dengan masing-masing dilakukan selama 10 menit. Proses pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-38 sebagai berikut.



Gambar 3-38 Proses Pengujian

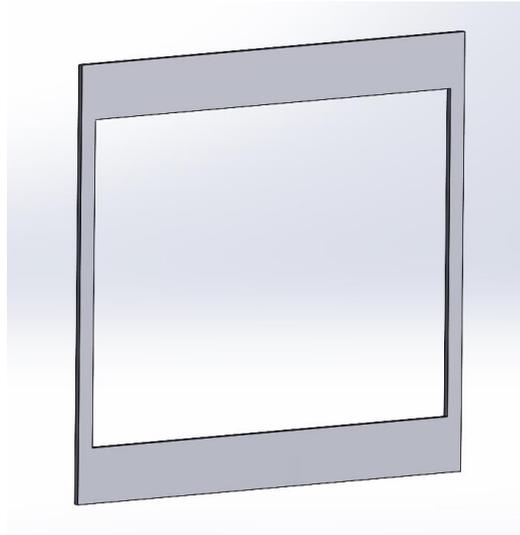
### 3.6 Proses Optimasi Desain

Proses ini adalah melakukan peningkatan desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* yang bertujuan mendapatkan optimasi dalam penggunaan energi, sehingga energi yang dikeluarkan lebih sedikit dari alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* saat ini. Pada bagian *heat exchanger* bentuk *heat wall* dirubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-39 sebagai berikut.



Gambar 3-39 Optimasi Desain *Heat Wall*

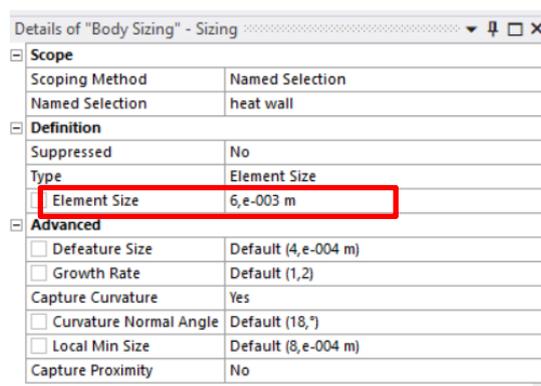
Desainnya dibuat miring pada sirip-siripnya agar udara dapat lebih bergerak lebih jauh didalam *heat exchanger* namun tidak menghalangi pergerakan udara. Jika dibuat menghalangi pergerakan udara dengan sirip-siripnya yang tegak maka udara akan menjadi lebih rendah temperaturnya karena datangnya udara baru dari *blower* membuat dingin udara yang sudah mulai panas. Pada bagian ruang pengering bentuk *partition wall* dirubah dengan tujuan supaya distribusi temperatur pada ruang pengering lebih merata dari sebelumnya dengan membuat lubang yang besar. Desain dari *partition wall* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-40 sebagai berikut.



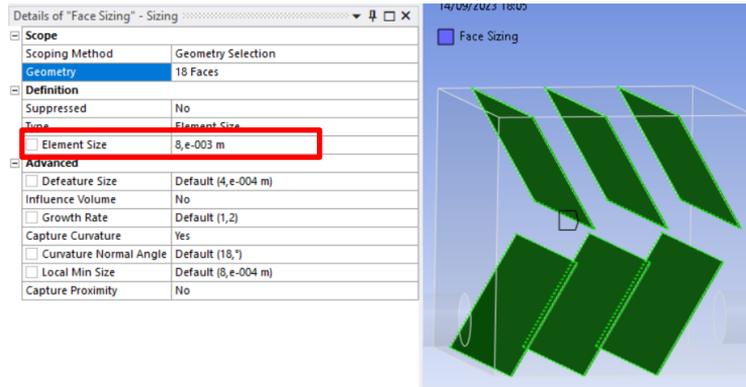
Gambar 3-40 Optimasi Desain *Partition Wall*

Tahapan selanjutnya adalah melakukan *import design for simulation* yang sudah dibuat menggunakan *Solidworks 2021* ke *Ansys Student R1 2023*. Hal-hal yang dilakukan semua sama, namun karena memiliki geometri yang berbeda maka pengaturan untuk *mesh*, *heat flux* ( $q$ ), dan nilai *heat transfer coefficient* ( $h_c$ ) menjadi berbeda.

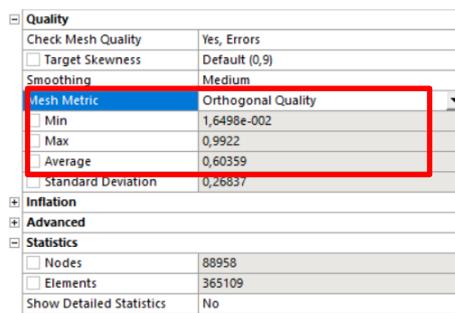
*Mesh* menggunakan tiga *element sizing* juga yaitu *global sizing*, *body sizing*, dan *face sizing* dengan ukurannya berturut-turut yaitu 0,08 m, 0,006 m, dan 0,008 m. Hasilnya memiliki jumlah *nodes* sebanyak 88.958 dan *elements* sebanyak 365.109, Kemudian untuk *orthogonal quality* dan *skewness quality* memiliki nilai rata-rata yaitu 0,60359 dan 0,39537. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-41, Gambar 3-42, Gambar 3-43, dan Gambar 3-44 sebagai berikut.



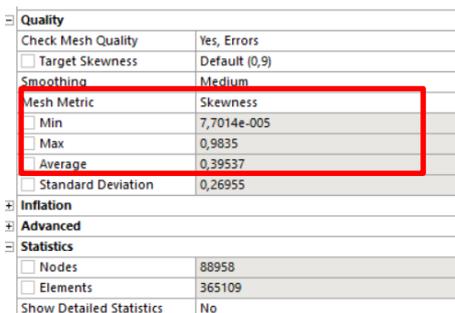
Gambar 3-41 *Body Sizing*



Gambar 3-42 *Face Sizing*

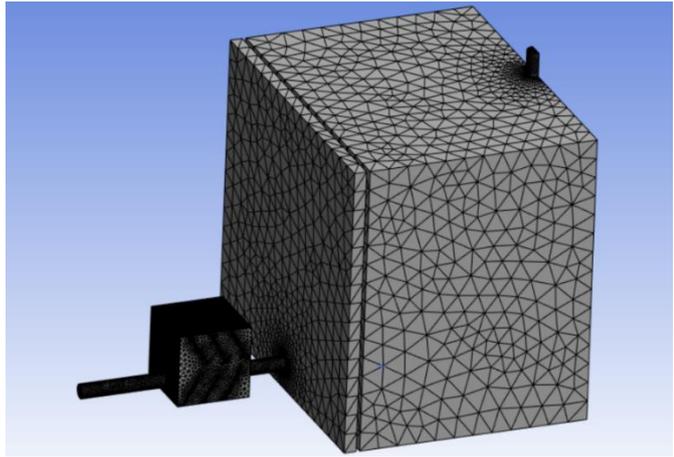


Gambar 3-43 *Orthogonal Quality*

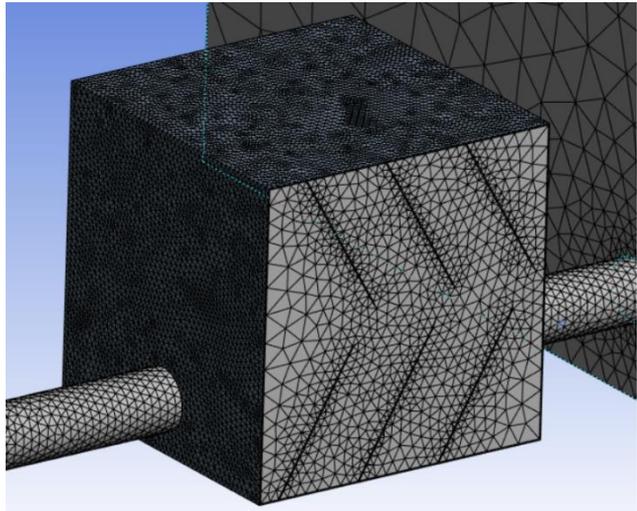


Gambar 3-44 *Skewness Quality*

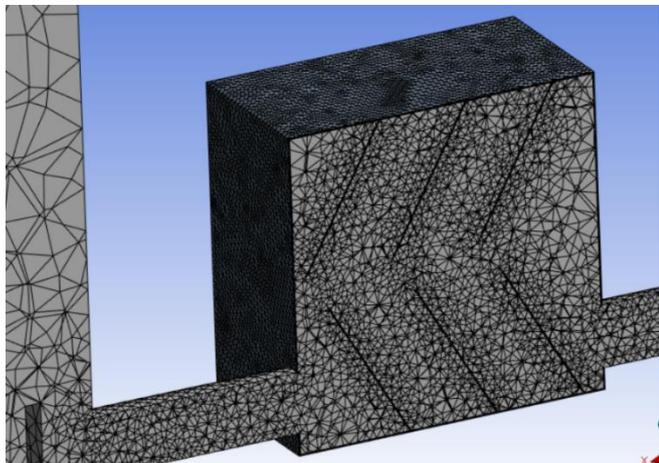
Bentuk *mesh* dari pengaturan ini ditunjukkan pada Gambar 3-45, Gambar 3-46, dan Gambar 3-47 sebagai berikut.



Gambar 3-45 *Detail Meshing 1*

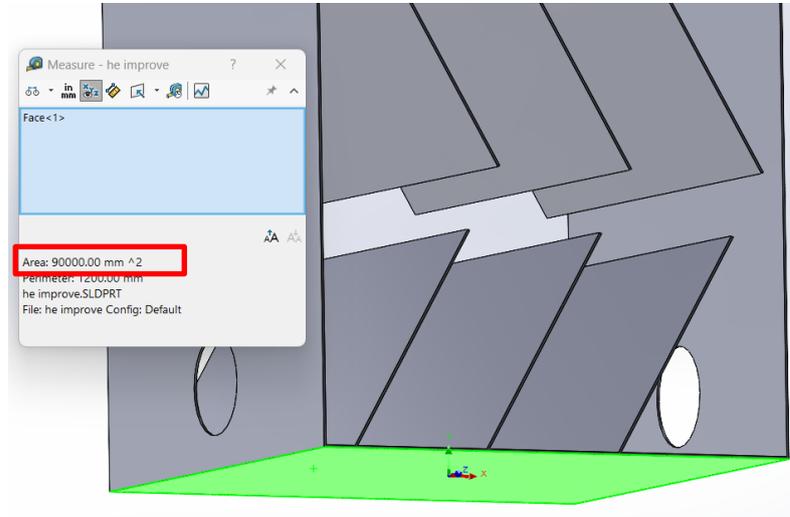


Gambar 3-46 *Detail Meshing 2*



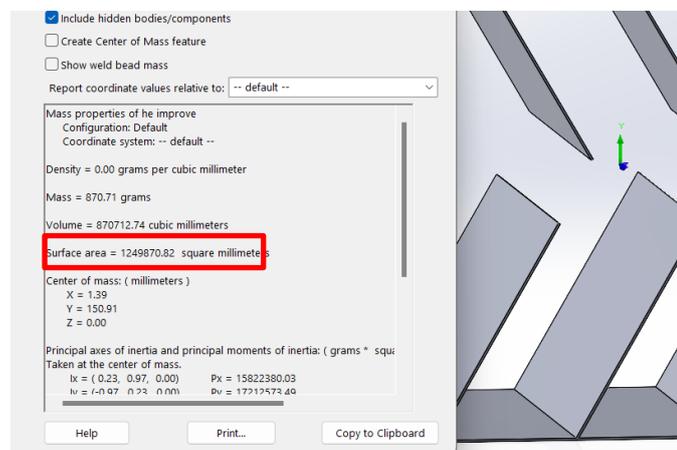
Gambar 3-47 *Detail Meshing 3*

Pada nilai *heat flux*, karena hanya dari geometrinya saja yang berubah sehingga nilai *heat flux* sempurna bukaan 1/2 katup masih tetap sama. Perbedaan luas permukaan bagian bawah yang mengalami kontak dengan *burner* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-48 sebagai berikut.

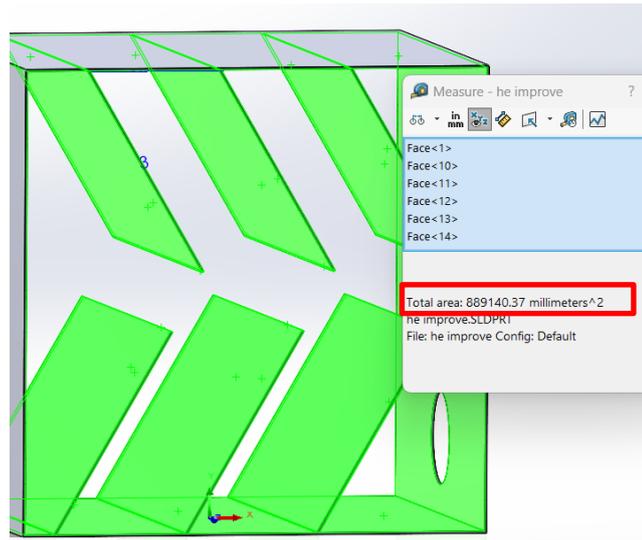


Gambar 3-48 Luas Permukaan Optimasi Desain *Heat Wall* Kontak dengan *Burner*

Hal yang serupa pada nilai *heat transfer coefficient*. Dengan menggunakan persamaan (3.14) hanya yang berubah adalah panjang karakteristiknya ( $L_c$ ) saja. Volume dan luas permukaan konveksi optimasi desain pada *heat wall* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-49 dan Gambar 3-50 sebagai berikut.



Gambar 3-49 Volume Optimasi Desain *Heat Wall*



Gambar 3-50 Luas Permukaan Optimasi Desain *Heat Wall*

Maka hasil dari perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3-14 sebagai berikut.

Tabel 3-14 Perhitungan Optimasi Desain

Kecepatan (m/s)	$q_{sempurna}$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{merata}$ (W/m <sup>2</sup> )	$L_c$ (m)	$h_c$ (W/(m <sup>2</sup> .K))
25,91 (1/2 Katup)	87.017,88	6.147,81	$9,79 \times 10^{-4}$	5.328,76

Selanjutnya adalah melakukan *mesh dependency* untuk simulasi desain yang sudah dioptimasi. Data yang didapatkan berdasarkan simulasi seperti pada Tabel 3-15 dan selisih datanya pada Tabel 3-16 sebagai berikut.

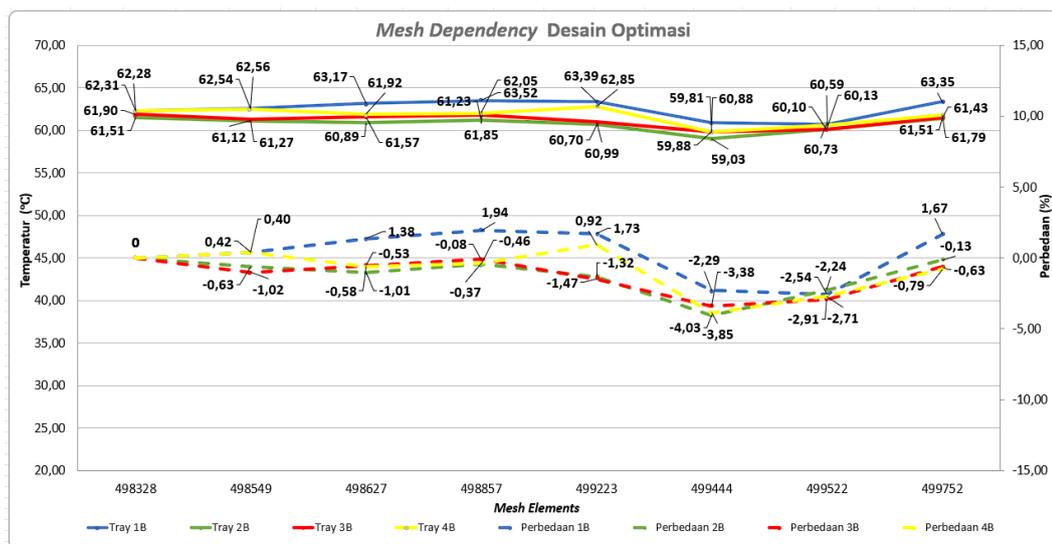
Tabel 3-15 Data *Mesh Dependency* Optimasi Desain

Data	Element Sizing (mm)			Mesh Elements	Temperature (°C)				Calculation Time (s)
	Global Sizing	Body Sizing	Face Sizing		1B	2B	3B	4B	
1	80,00	6,00	8,00	365.109	62,31	61,51	61,90	62,28	2352
2	79,95	6,00	8,00	365.338	62,56	61,12	61,27	62,54	2367
3	80,00	5,95	8,00	365.488	63,17	60,89	61,57	61,92	2389
4	79,95	5,95	8,00	365.717	63,52	61,23	61,85	62,05	2395
5	79,95	6,00	79,95	367.612	63,39	60,70	60,99	62,85	2421
6	80,00	6,00	79,95	367.694	60,88	59,03	59,81	59,88	2423
7	79,95	5,95	79,95	367.991	60,73	60,13	60,10	60,59	2447
8	80,00	5,95	79,95	368.073	63,35	61,43	61,51	61,79	2480

Tabel 3-16 Selisih Data Mesh Dependency Optimasi Desain

Data	Tray 1B (%)	Tray 2B (%)	Tray 3B (%)	Tray 4B (%)
1	0	0	0	0
2 ke 1	0,40	-1,21	0,96	-0,63
3 ke 1	1,38	0,80	-0,75	-1,01
4 ke 1	1,94	-0,63	2,14	-0,46
5 ke 1	1,73	1,37	-1,94	-1,32
6 ke 1	-2,29	-4,57	-3,36	-4,03
7 ke 1	-2,54	-4,88	-3,12	-2,24
8 ke 1	1,67	-3,28	-1,88	-0,13

Selanjutnya selisih data tersebut dibuat grafik seperti pada Gambar 3-51 sebagai berikut.



Gambar 3-51 Mesh Dependency Optimasi Desain

Berdasarkan grafik yang telah ditampilkan menurut persamaan (2.8), tidak ada perbedaan selisih data yang melebihi dari 5,00%. Sehingga data pertama atau sebagai data acuan dapat dikatakan optimal pada simulasi ini karena memiliki *calculation time* yang rendah namun sudah akurat.

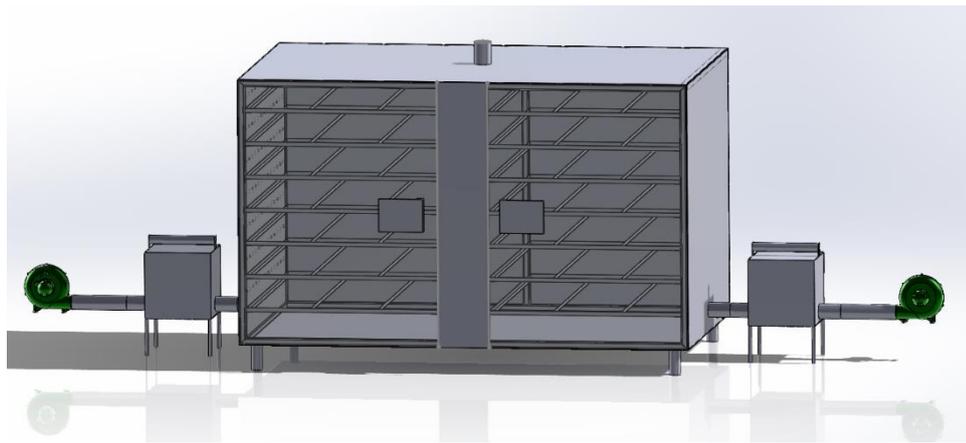
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Simulasi dan Pengujian Alat Pengering Biji Kakao

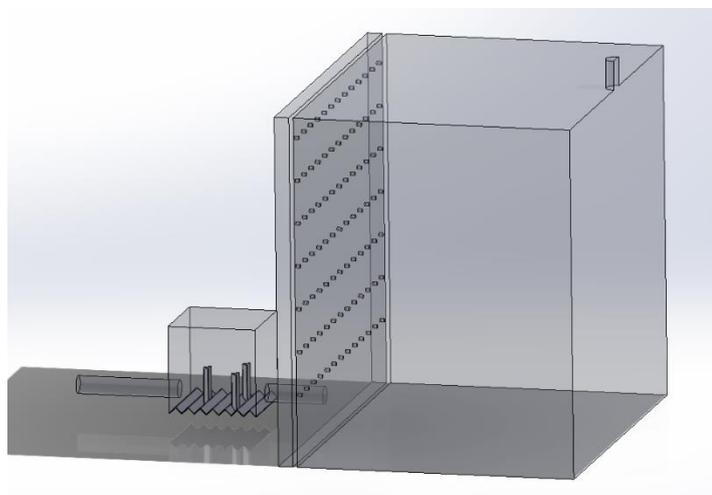
##### 4.1.1 Hasil Pembuatan Desain 3D Model

Dari hasil pembuatan desain 3D model hasil *design for manufacturing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-1 sebagai berikut.



Gambar 4-1 Hasil *Design for Manufacturing* Alat Pengering

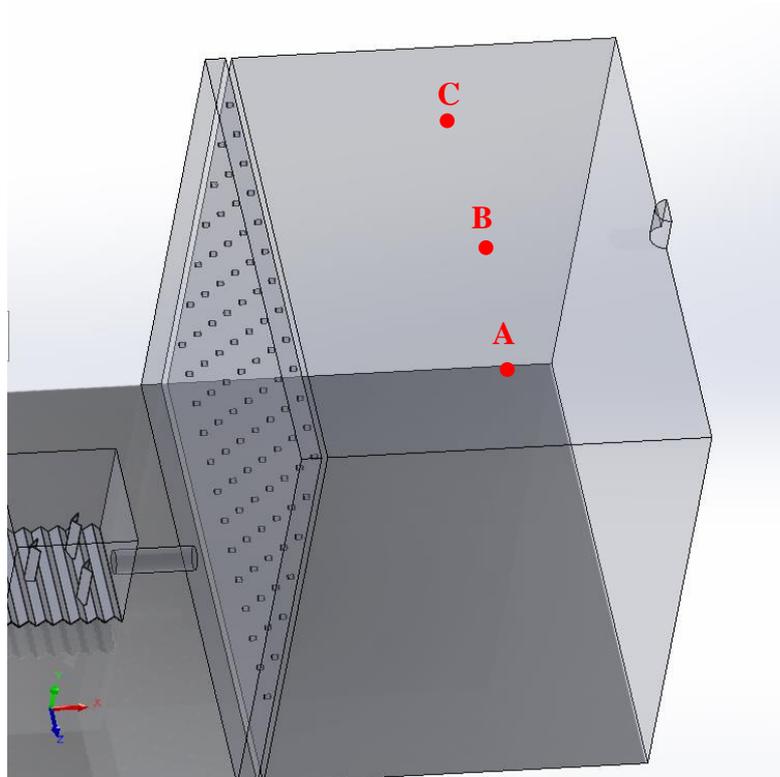
Hasil dari *design for simulation* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2 sebagai berikut.



Gambar 4-2 Hasil *Design for Simulation* Alat Pengering

### 4.1.2 Hasil Simulasi CFD

Simulasi ini mengambil 3 titik pada setiap tray 1, 2, 3, dan 4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-3 dan koordinat posisinya seperti pada Tabel 4-1 sebagai berikut.



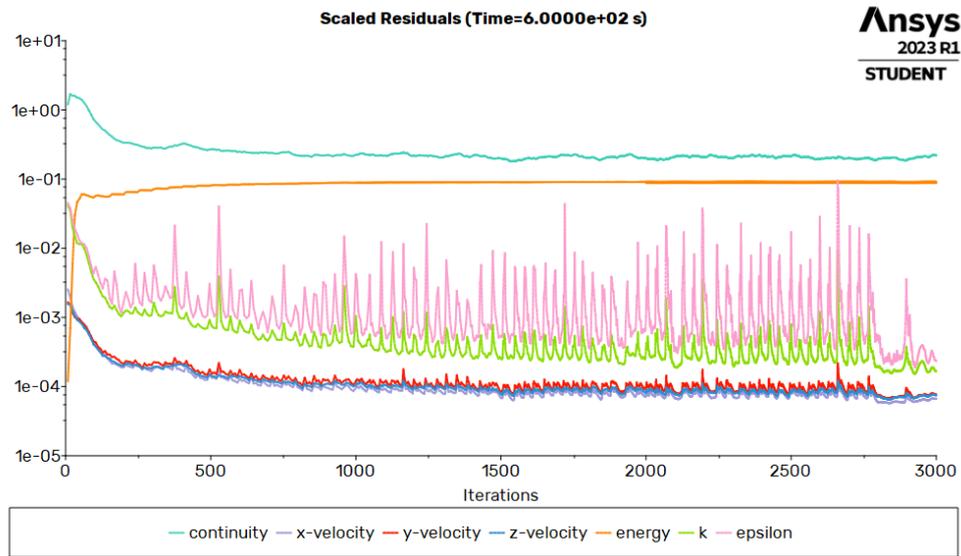
Gambar 4-3 Titik yang Disimulasikan Tiap Tray

Tabel 4-1 Koordinat Titik Dimulasikan

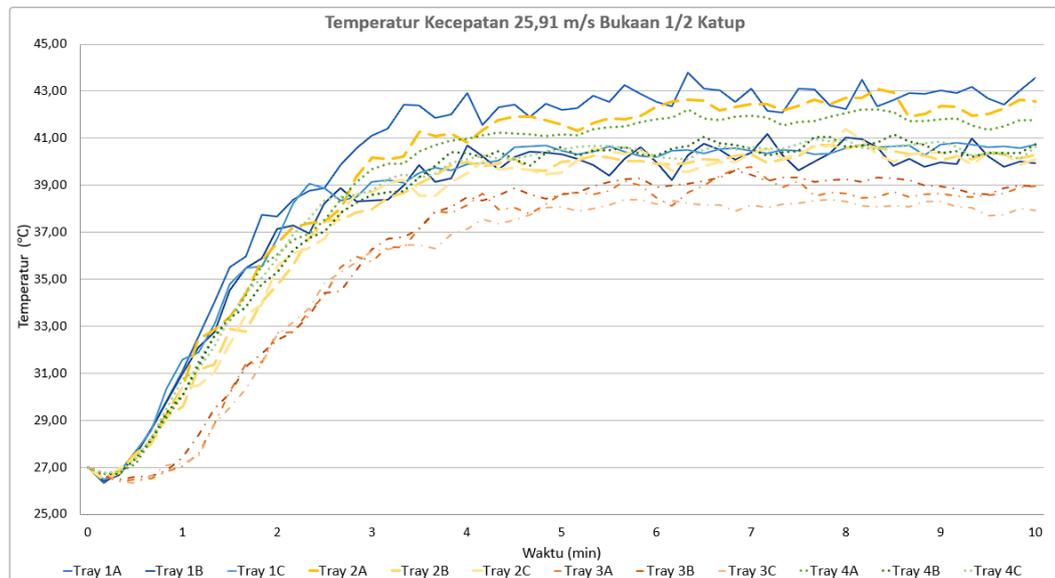
Tray	Titik	Sb. x (m)	Sb. y (m)	Sb. z (m)
1	A	0,5085	1,05525	-0,3235
	B	0,5085	1,05525	-0,6470
	C	0,5085	1,05525	-0,9705
2	A	0,5085	0,75375	-0,3235
	B	0,5085	0,75375	-0,6470
	C	0,5085	0,75375	-0,9705
3	A	0,5085	0,45225	-0,3235
	B	0,5085	0,45225	-0,6470
	C	0,5085	0,45225	-0,9705
4	A	0,5085	0,15075	-0,3235
	B	0,5085	0,15075	-0,6470
	C	0,5085	0,15075	-0,9705

### 4.1.2.1 Kecepatan 25,91 m/s Buka 1/2 Katup

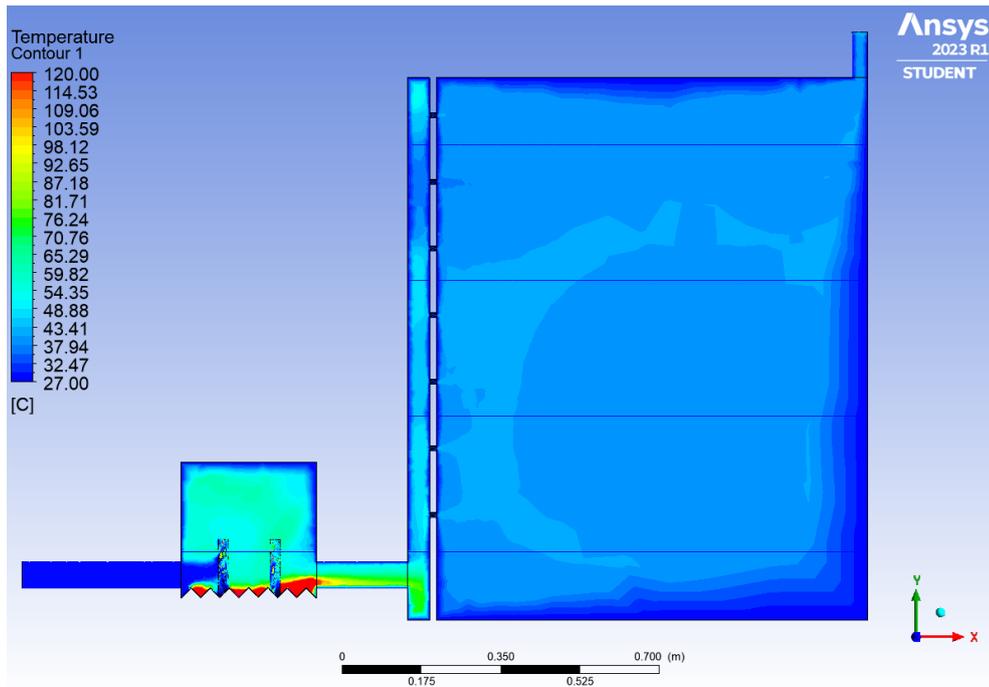
Hasil simulasi dengan *flowtime* selama 10 menit untuk kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-4 sampai Gambar 4-12 adalah sebagai berikut.



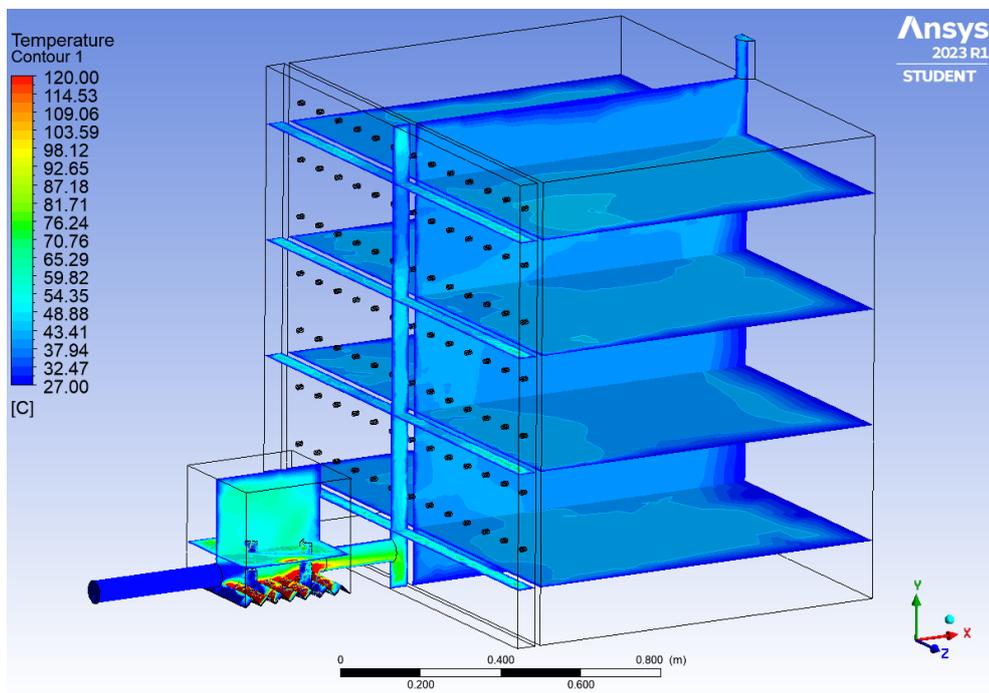
Gambar 4-4 Hasil *Scaled Residuals* Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



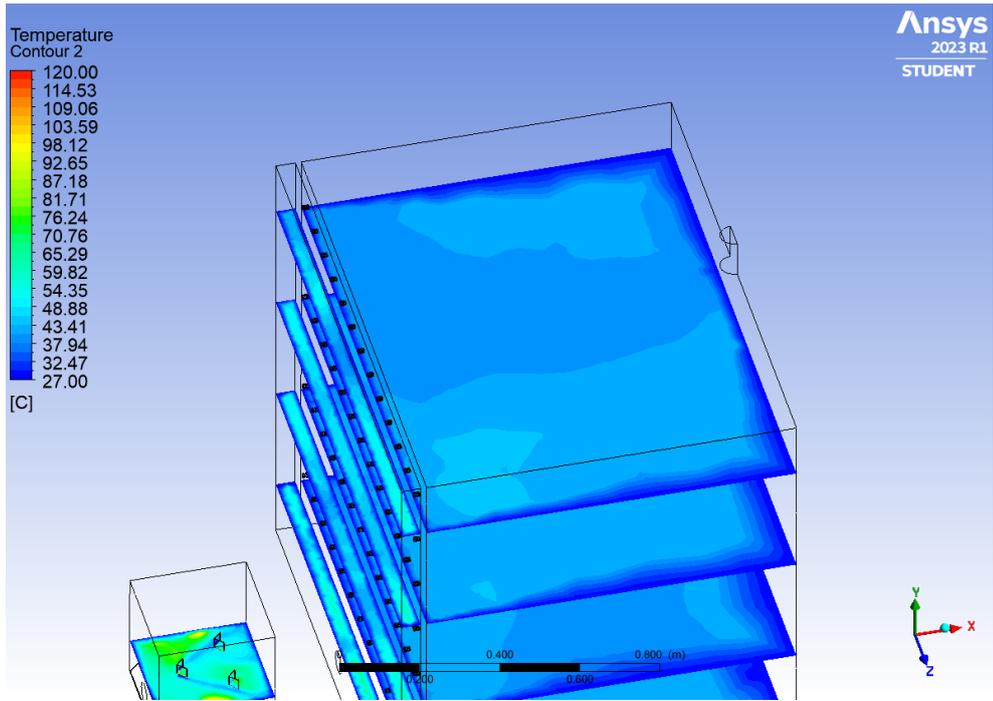
Gambar 4-5 Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



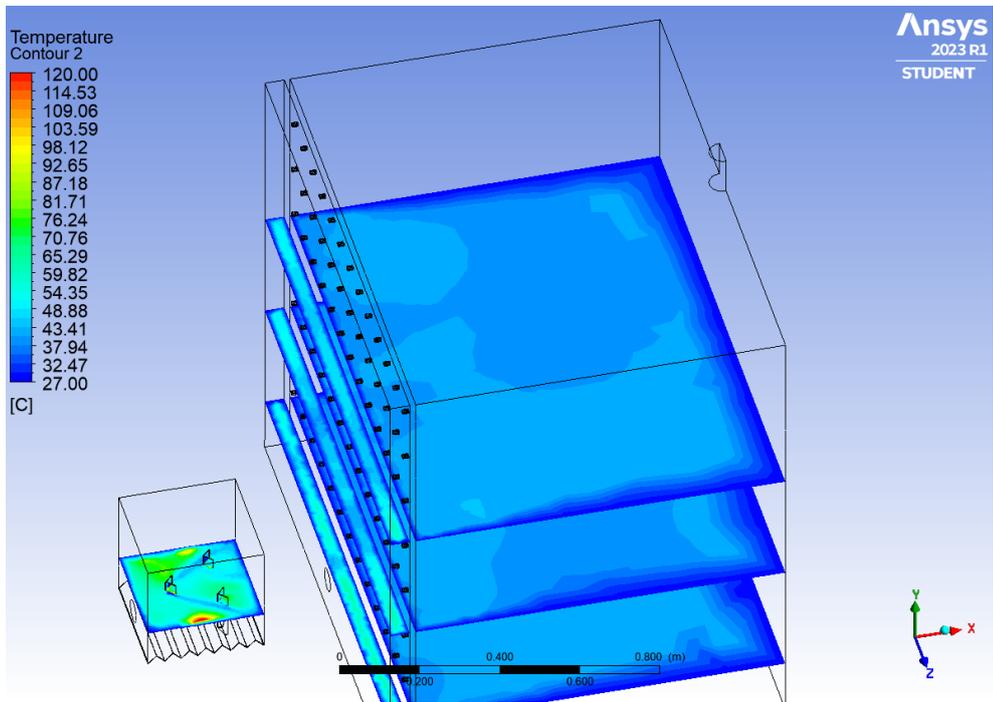
Gambar 4-6 Distribusi Temperatur *Plane XY* Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



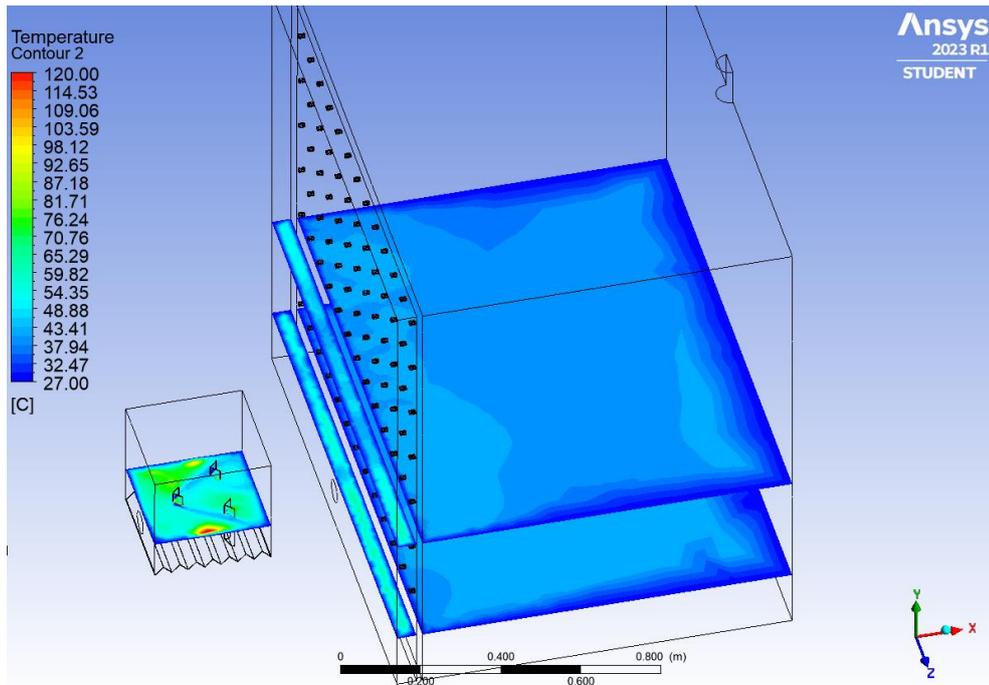
Gambar 4-7 Distribusi Temperatur *Isometric* Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



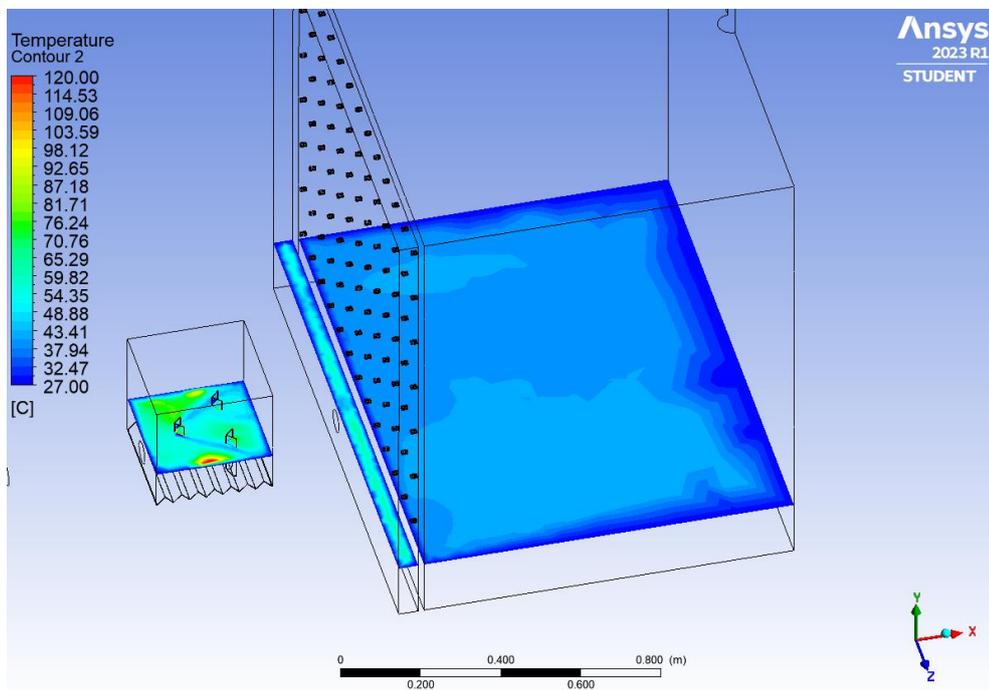
Gambar 4-8 Distribusi Temperatur Tray Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



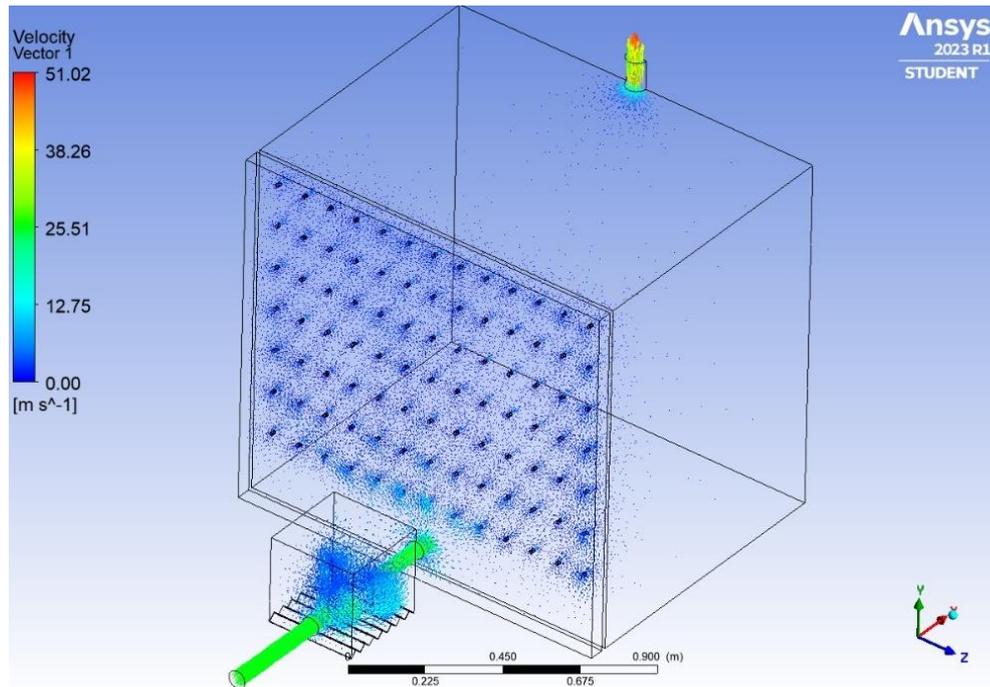
Gambar 4-9 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-10 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-11 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup

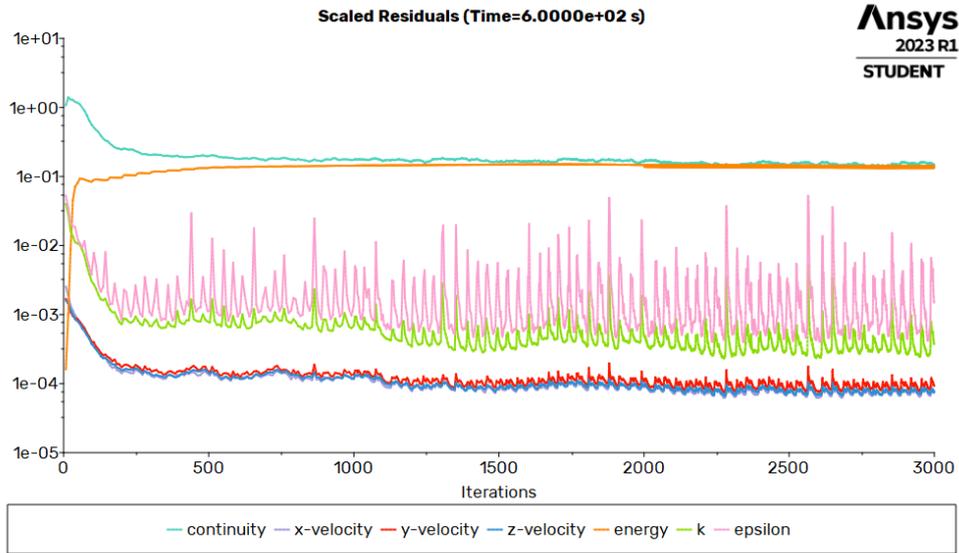


Gambar 4-12 Vektor Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup

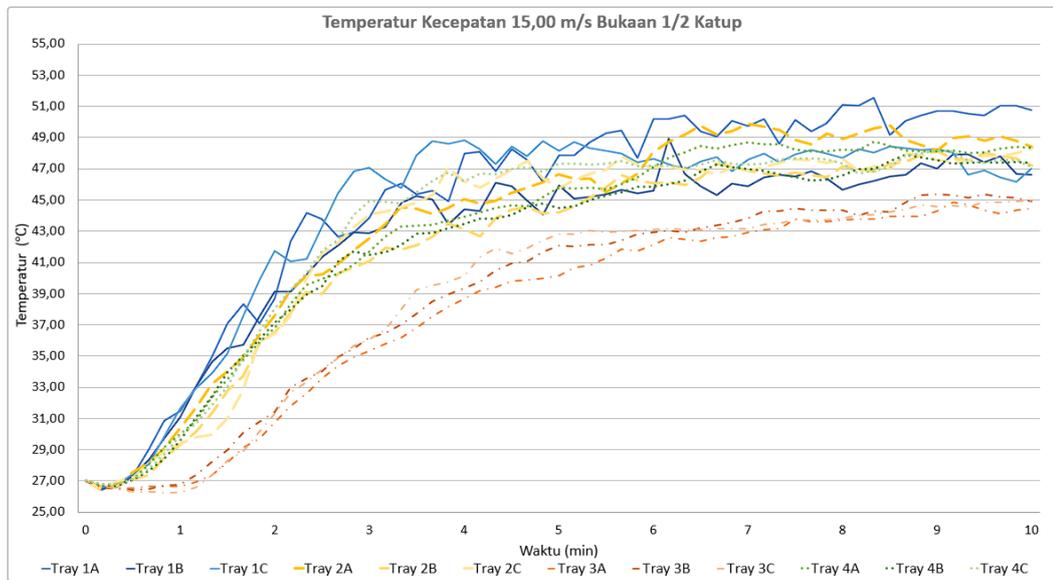
Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data acuan yaitu kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup memiliki temperatur berkisar di 37,94°C-43,55°C. Dimana 37,94°C terjadi pada koordinat 3C, sedangkan 43,55°C terjadi di posisi 1A.

#### 4.1.2.2 Variasi Kecepatan 15,00 m/s Bukaan 1/2 Katup

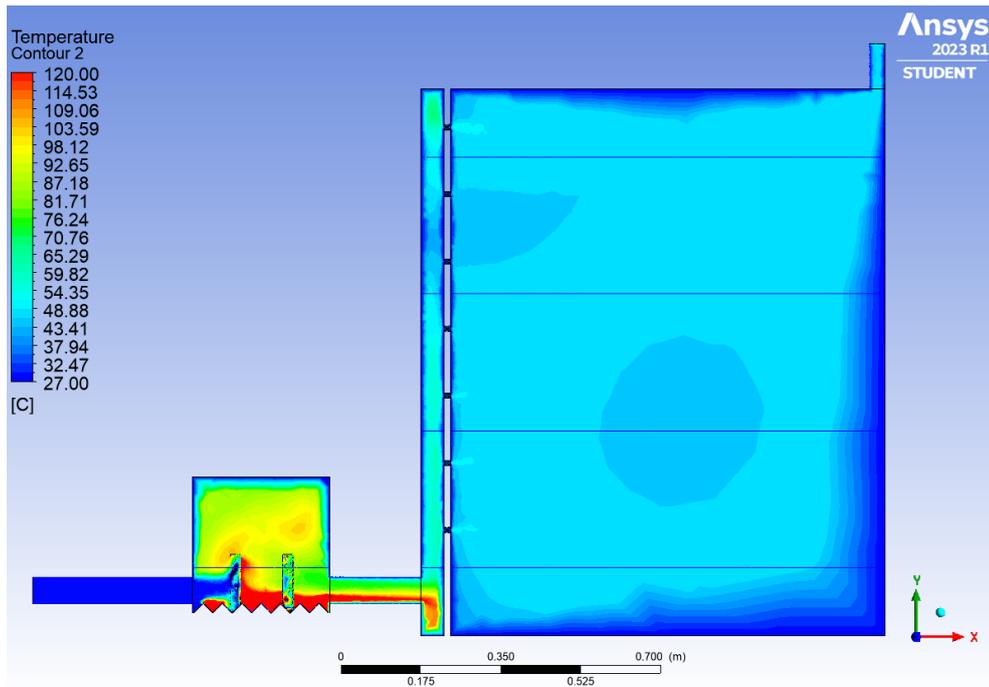
Hasil simulasi dengan *flowtime* selama 10 menit untuk variasi kecepatan 15,00 m/s bukaan 1/2 katup didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-13 sampai Gambar 4-21 adalah sebagai berikut.



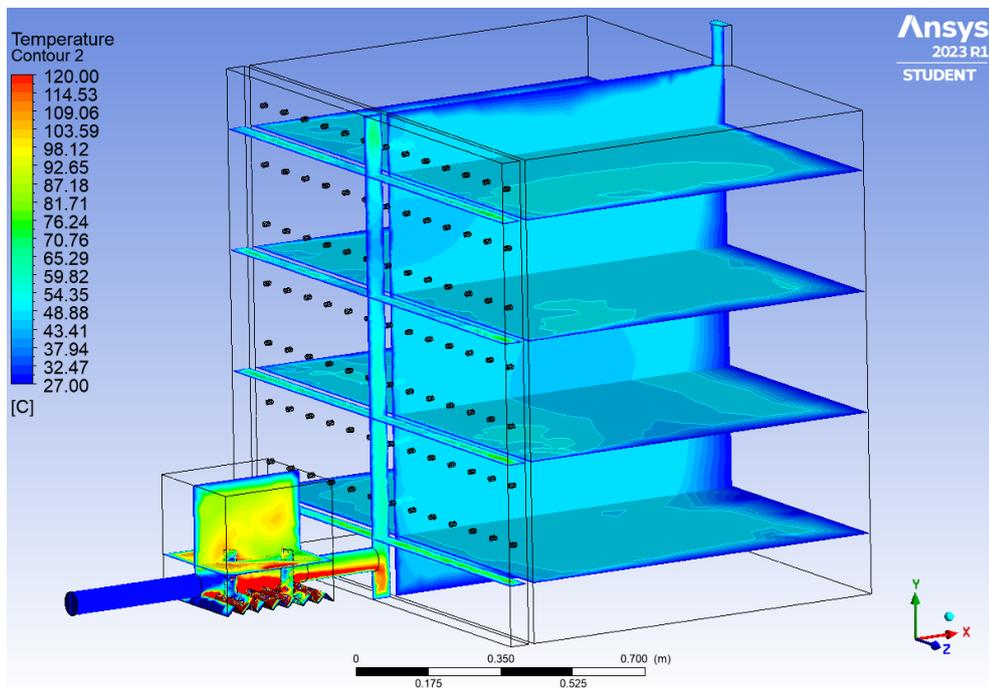
Gambar 4-13 Hasil *Scaled Residuals* Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



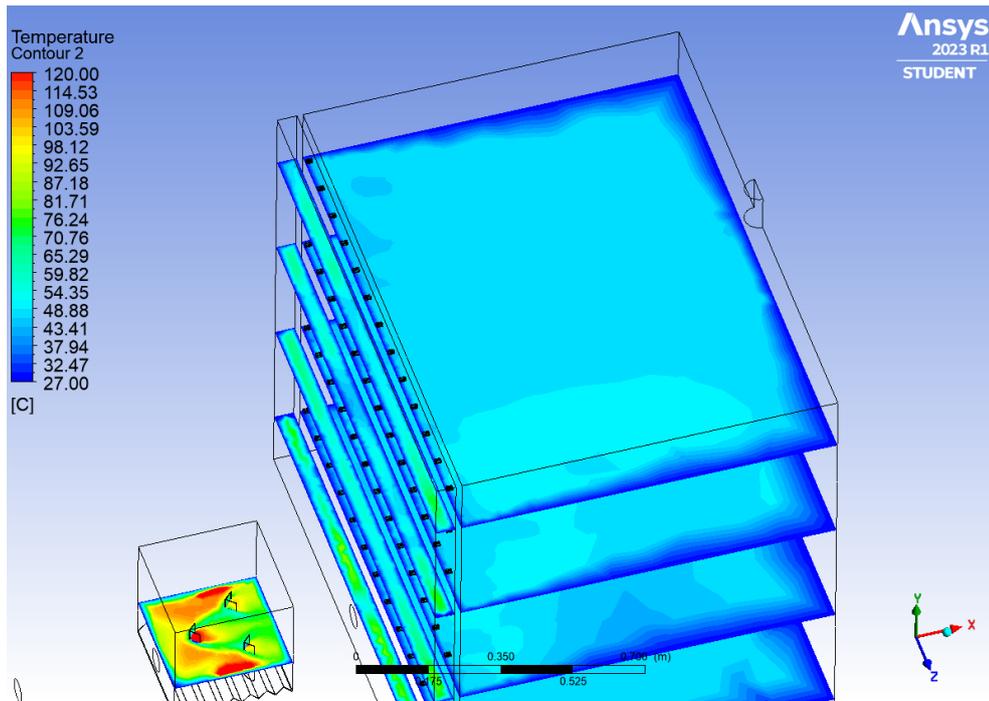
Gambar 4-14 Hasil Temperatur Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



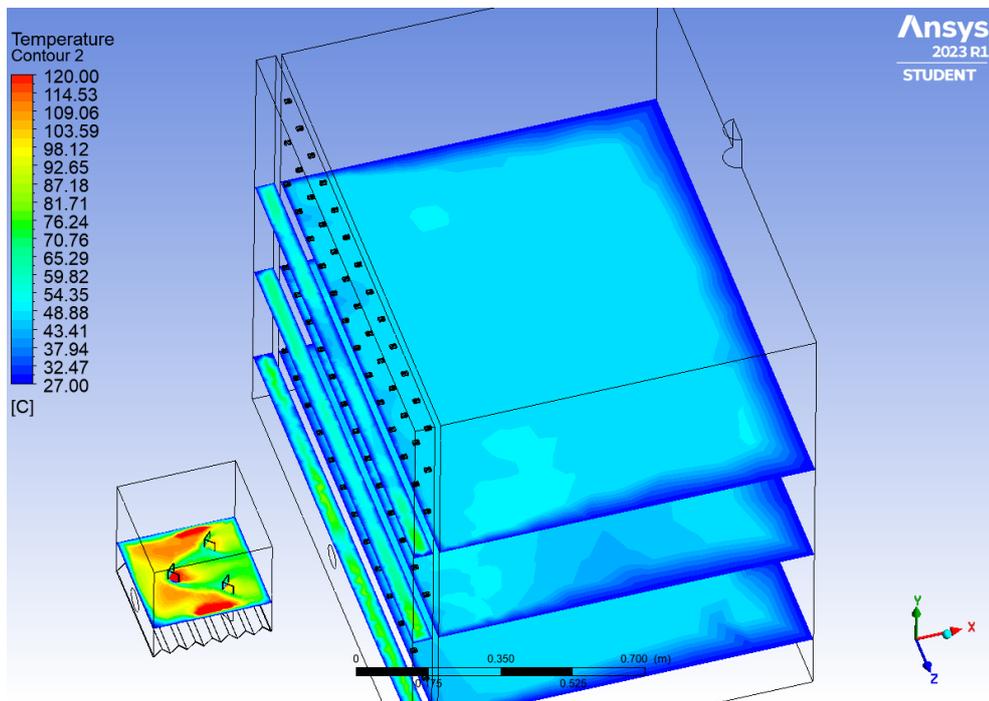
Gambar 4-15 Distribusi Temperatur *Plane XY* Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



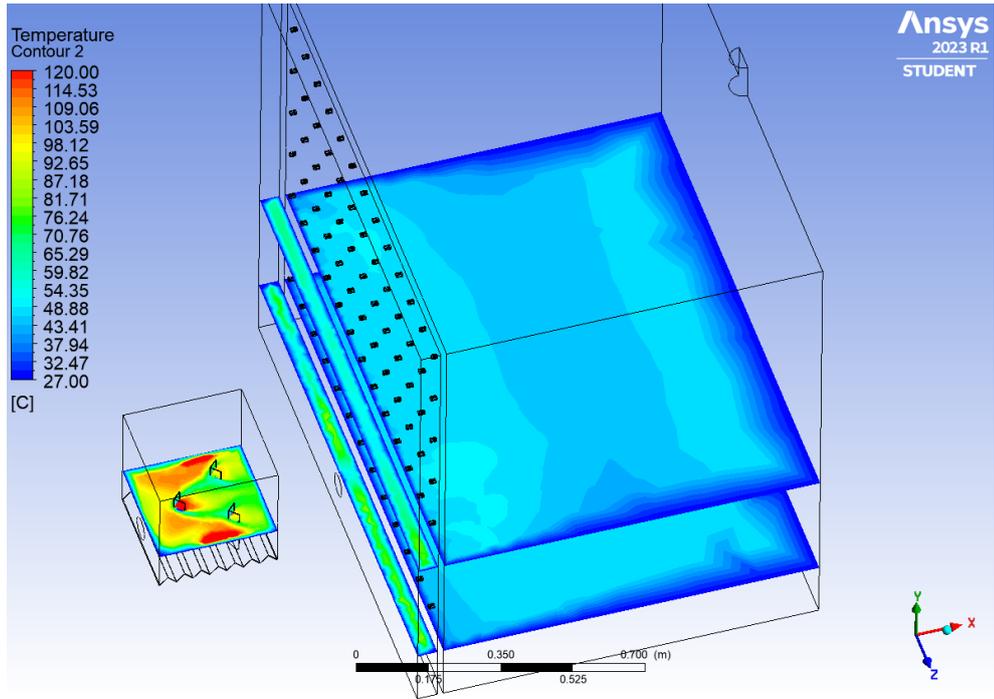
Gambar 4-16 Distribusi Temperatur *Isometric* Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



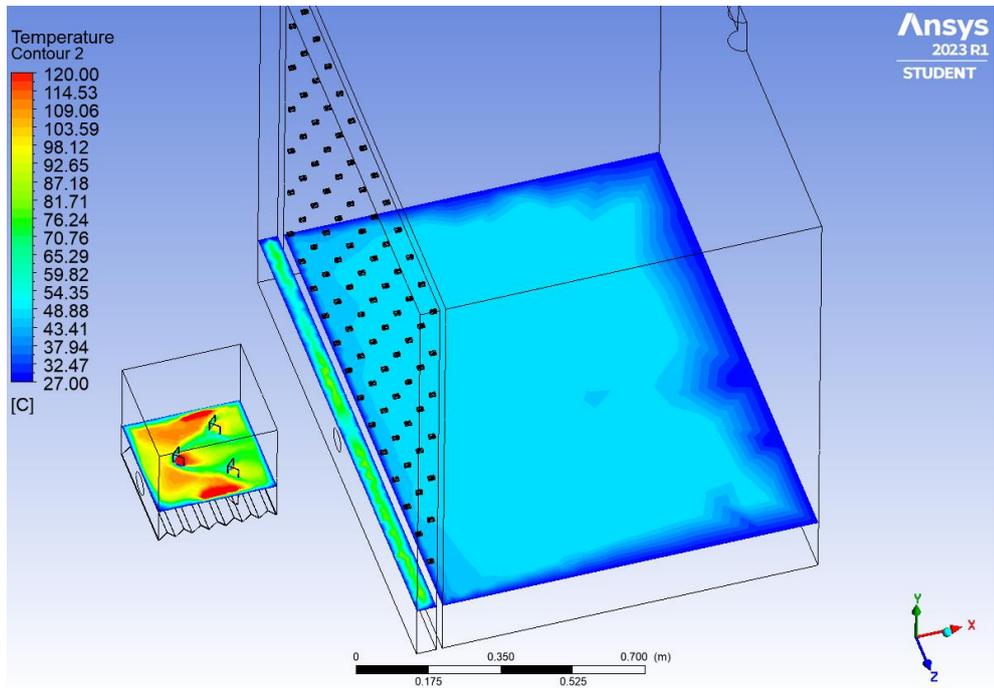
Gambar 4-17 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-1 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



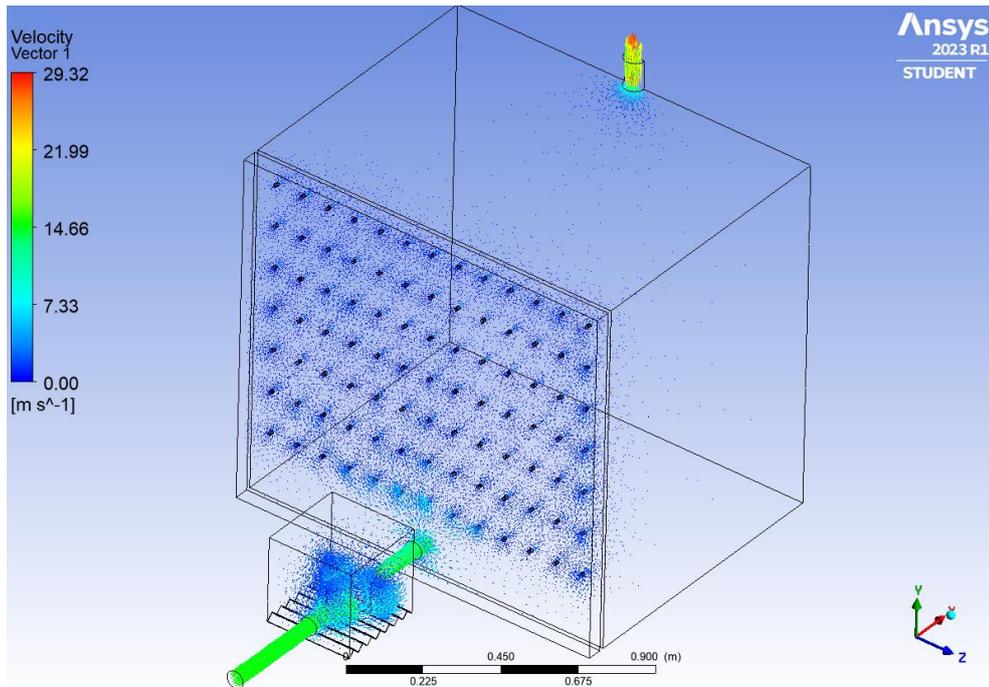
Gambar 4-18 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-2 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-19 Distribusi Temperatur Tray Ke-3 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-20 Distribusi Temperatur Tray Ke-4 Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup

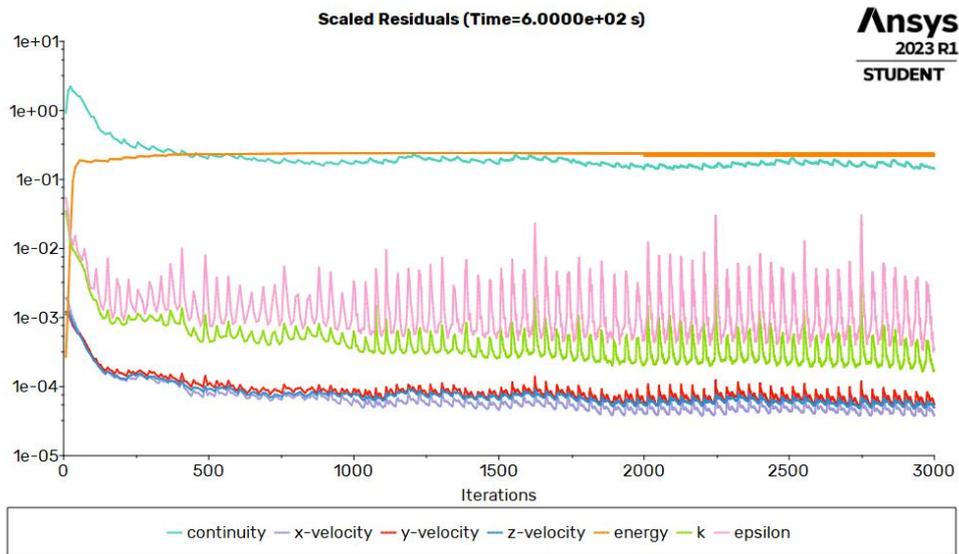


Gambar 4-21 Vektor Kec. 15,00 m/s 1/2 Katup

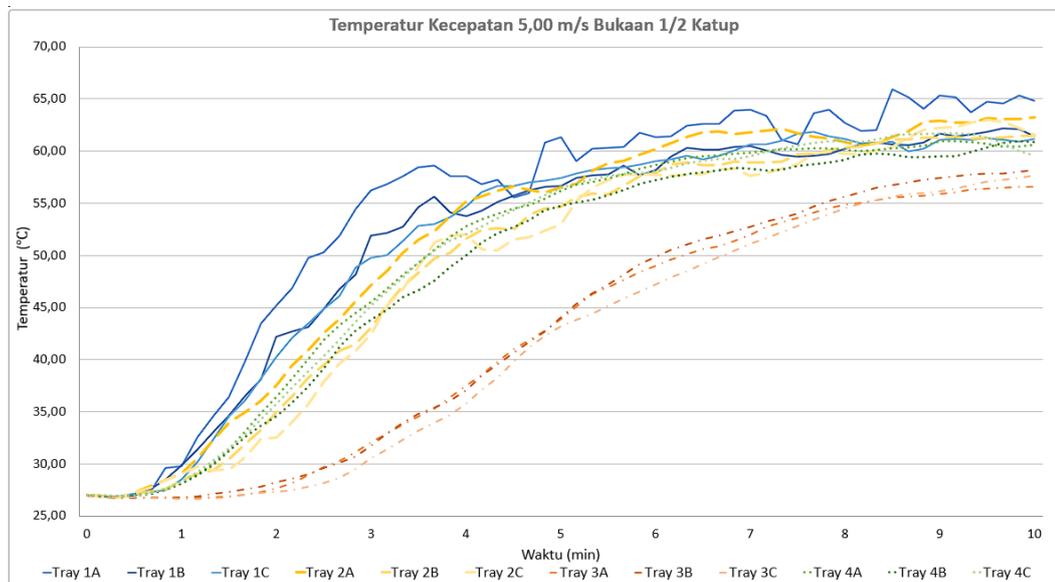
Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu variasi kecepatan 15,00 m/s bukaan 1/2 katup memiliki temperatur berkisar di 44,45°C-50,73°C. Dimana 44,45°C terjadi pada koordinat 3A, sedangkan 50,73°C terjadi di posisi 1A.

#### 4.1.2.3 Variasi Kecepatan 5,00 m/s Bukaan 1/2 Katup

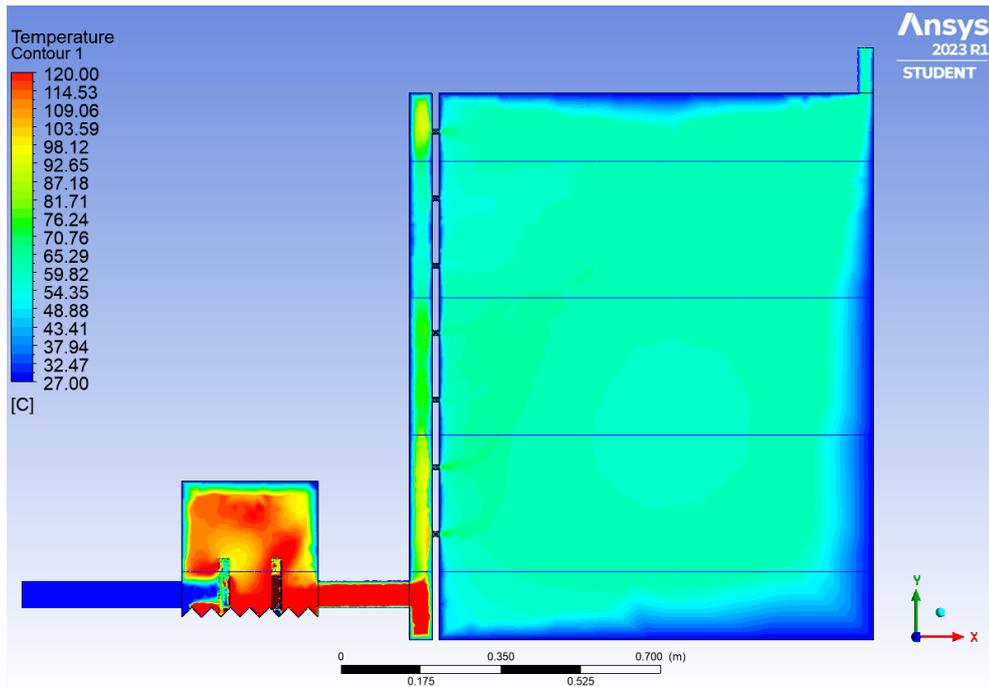
Hasil simulasi dengan *flowtime* selama 10 menit untuk variasi kecepatan 5,00 m/s bukaan 1/2 katup didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-22 sampai Gambar 4-30 adalah sebagai berikut.



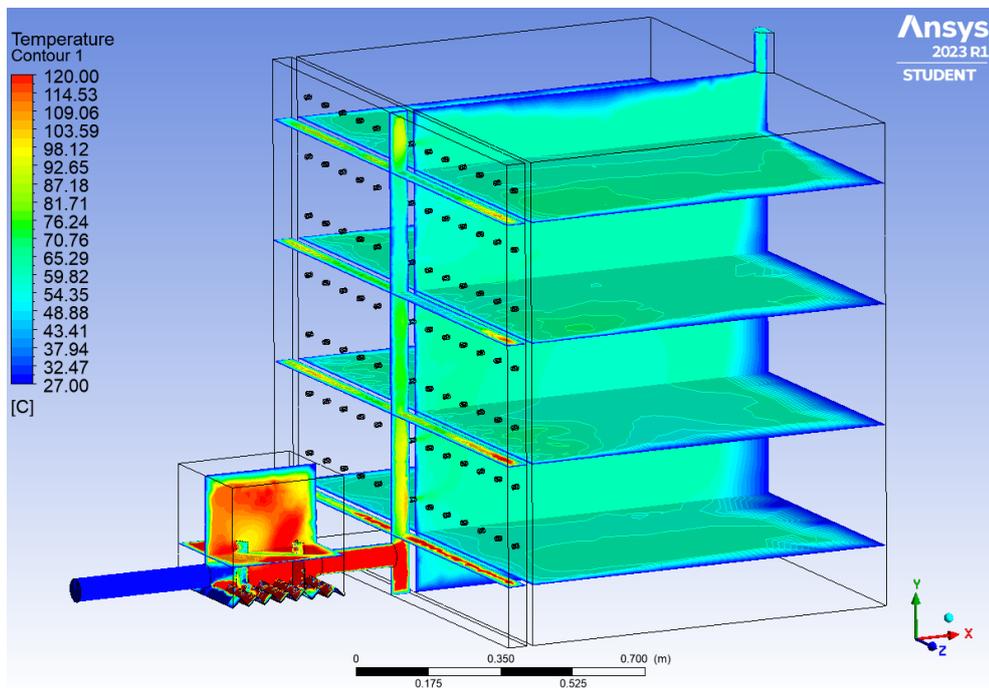
Gambar 4-22 Hasil *Scaled Residuals* Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



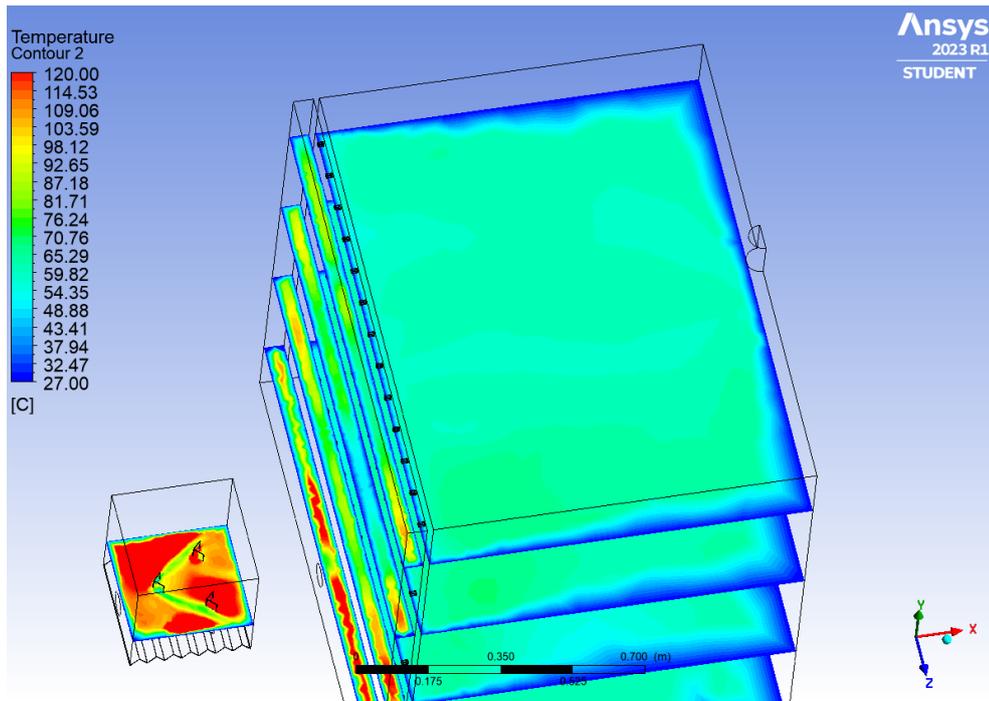
Gambar 4-23 Hasil Temperatur Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



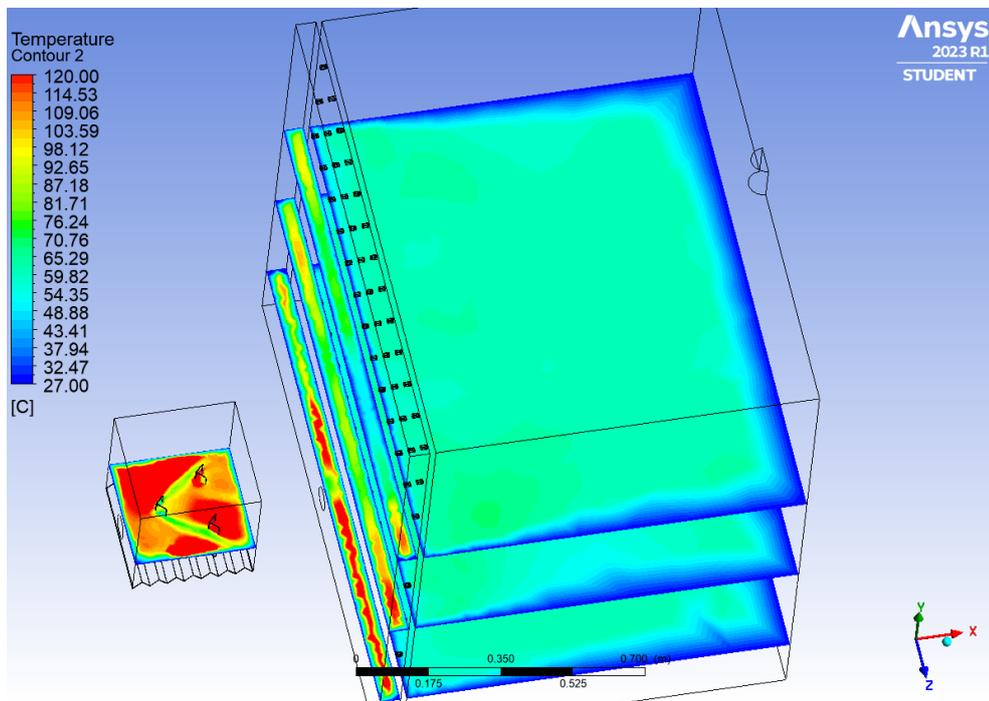
Gambar 4-24 Distribusi Temperatur *Plane XY* Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



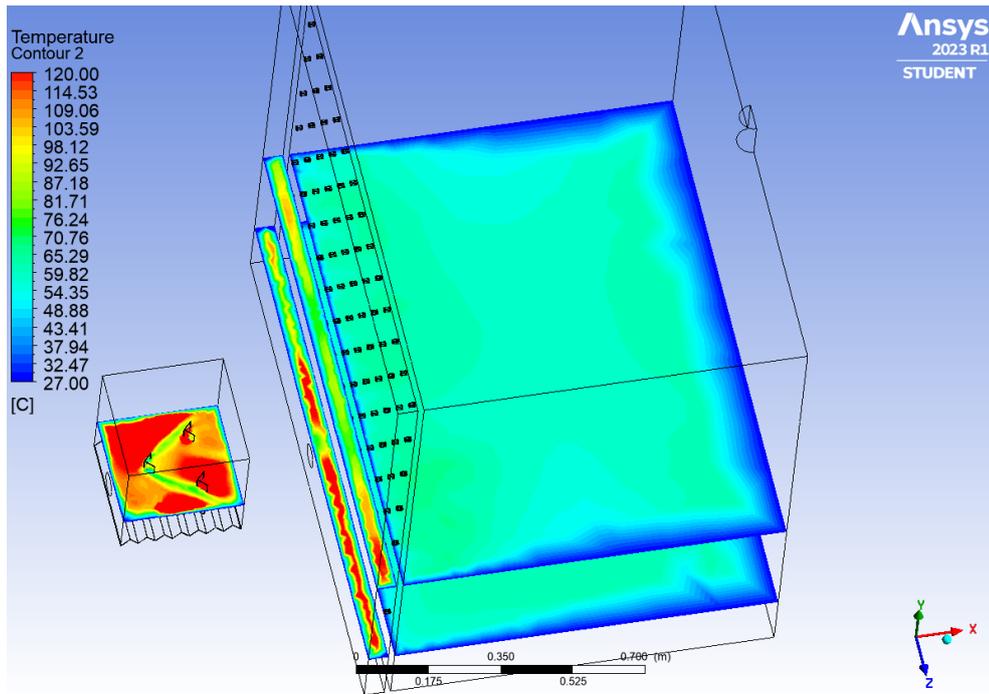
Gambar 4-25 Distribusi Temperatur *Isometric* Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



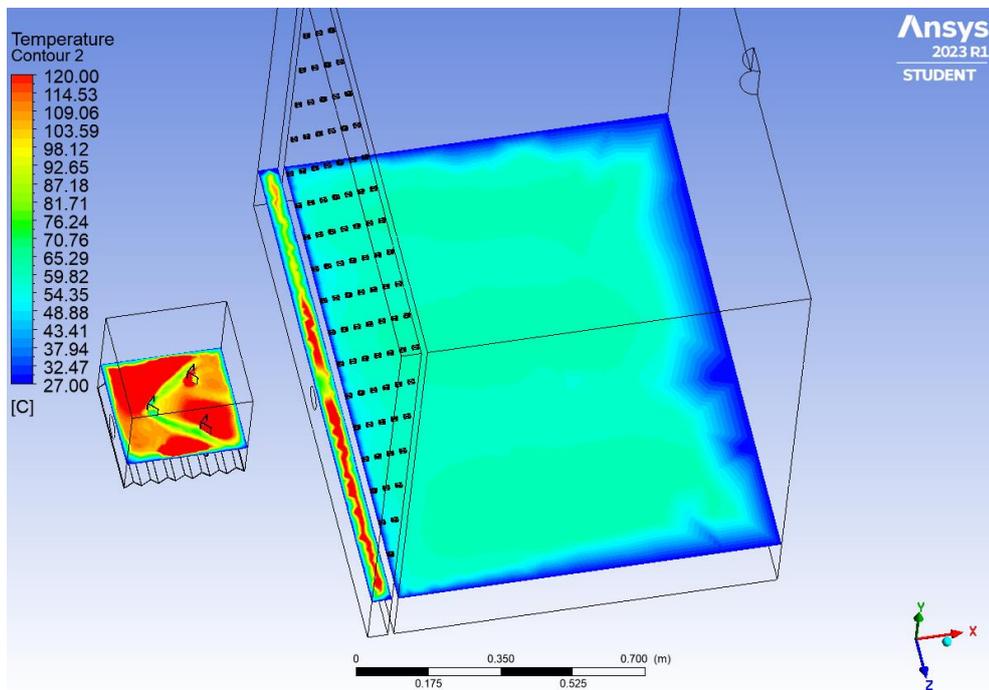
Gambar 4-26 Distribusi Temperatur Tray Ke-1 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



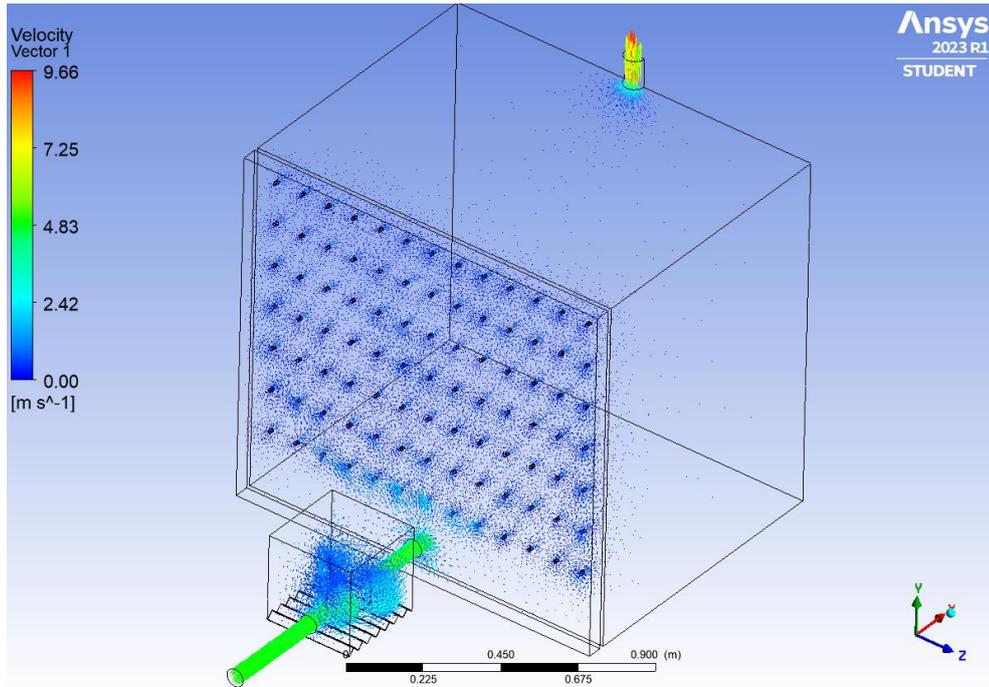
Gambar 4-27 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-28 Distribusi Temperatur Tray Ke-3 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup



Gambar 4-29 Distribusi Temperatur Tray Ke-4 Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup

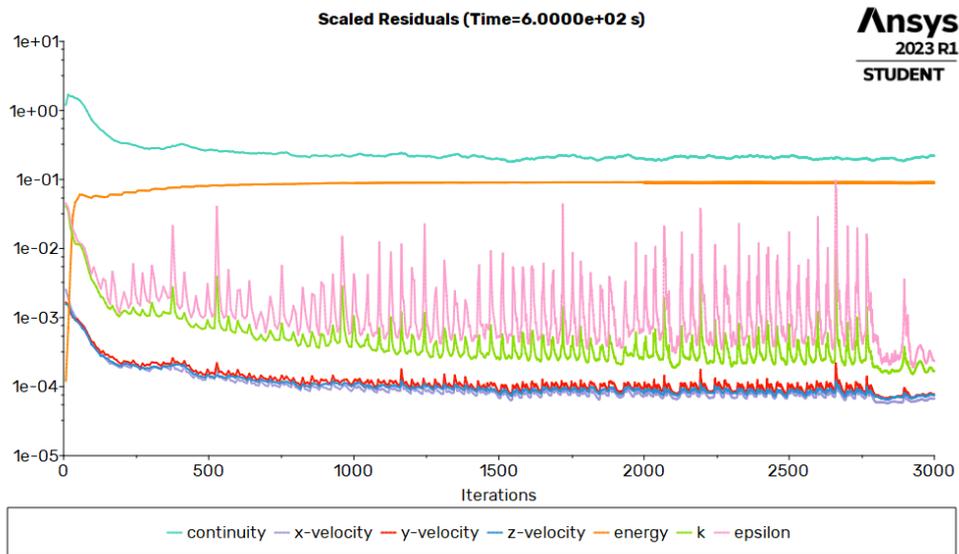


Gambar 4-30 Vektor Kec. 5,00 m/s 1/2 Katup

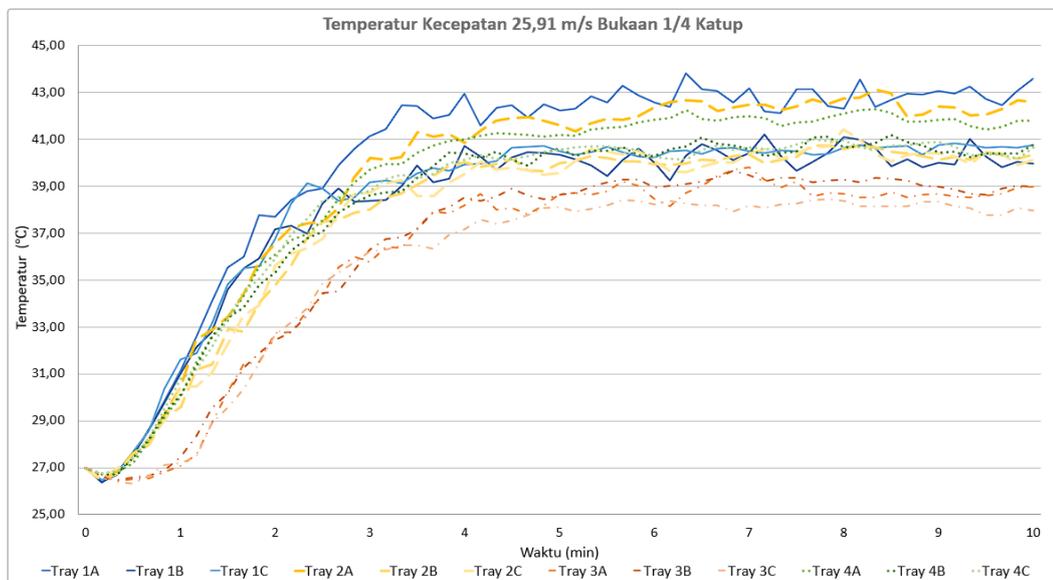
Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu variasi kecepatan 5,00 m/s bukaan 1/2 katup memiliki temperatur berkisar di 56,56°C-64,85°C. Dimana 56,56°C terjadi pada koordinat 3A, sedangkan 64,85°C terjadi di posisi 1A.

#### 4.1.2.4 Variasi Kecepatan 25,91 m/s Bukaan 1/4 Katup

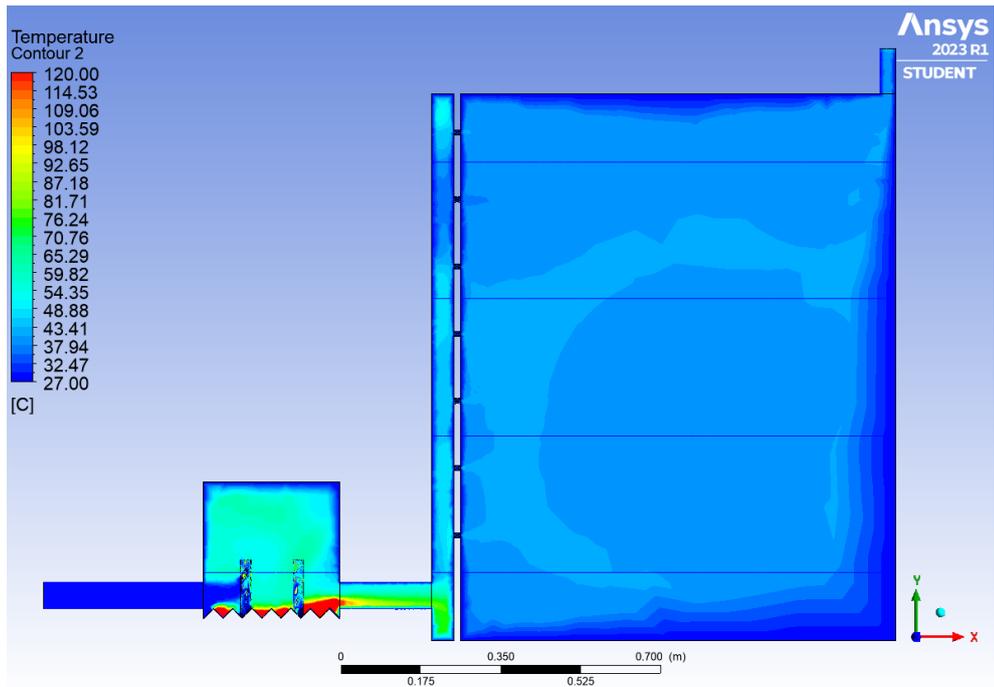
Hasil variasi kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/4 katup didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-31 sampai Gambar 4-39 adalah sebagai berikut.



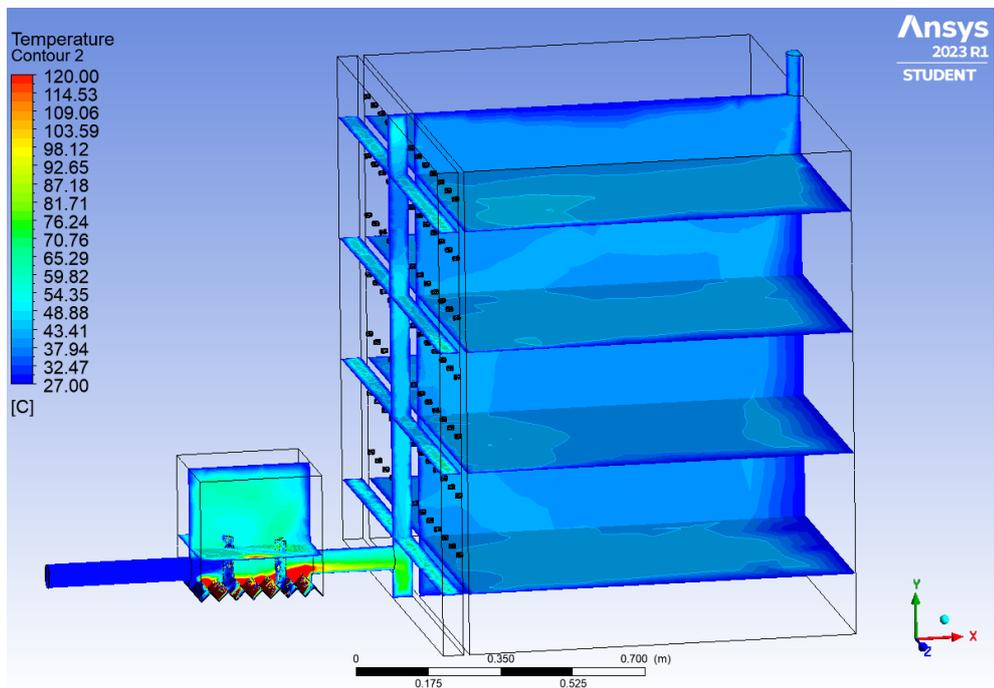
Gambar 4-31 Hasil *Scaled Residuals* Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



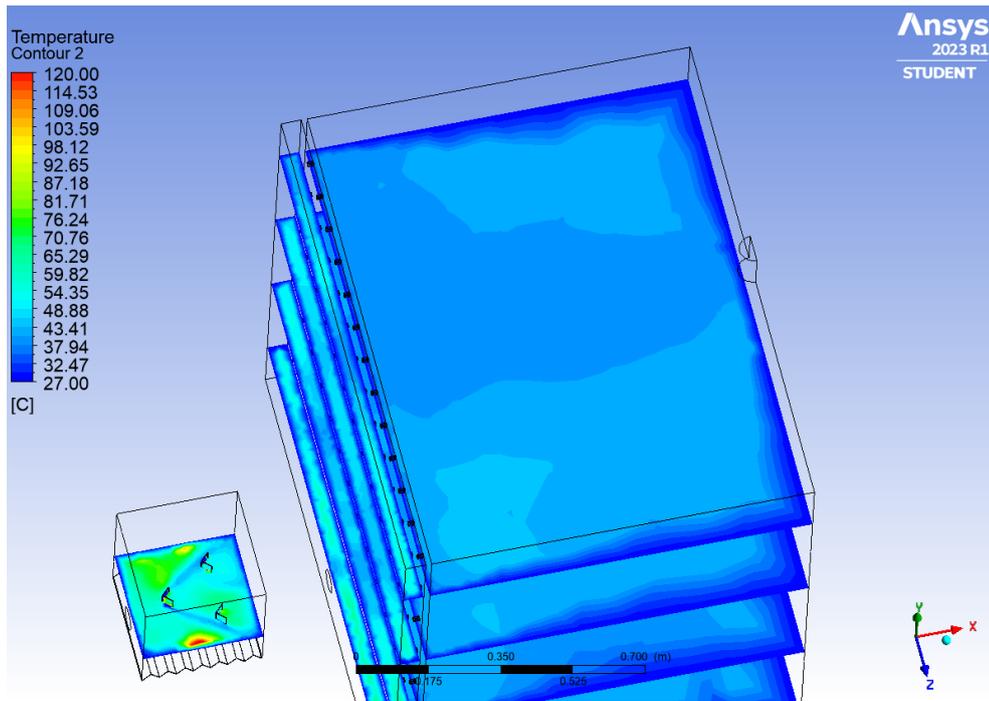
Gambar 4-32 Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



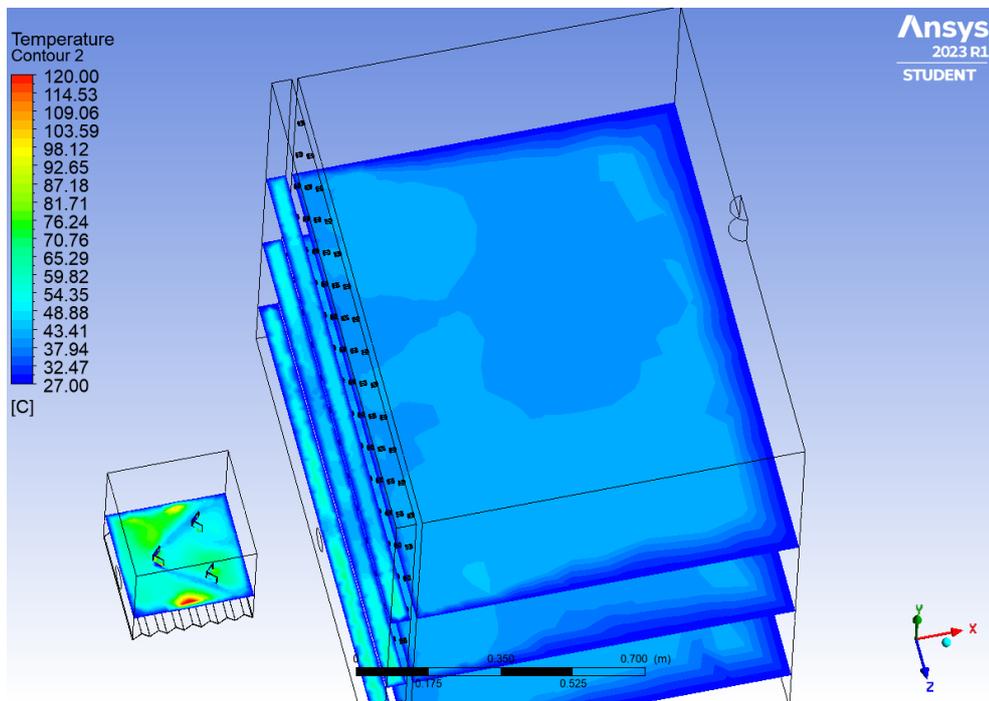
Gambar 4-33 Distribusi Temperatur *Plane XY* Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



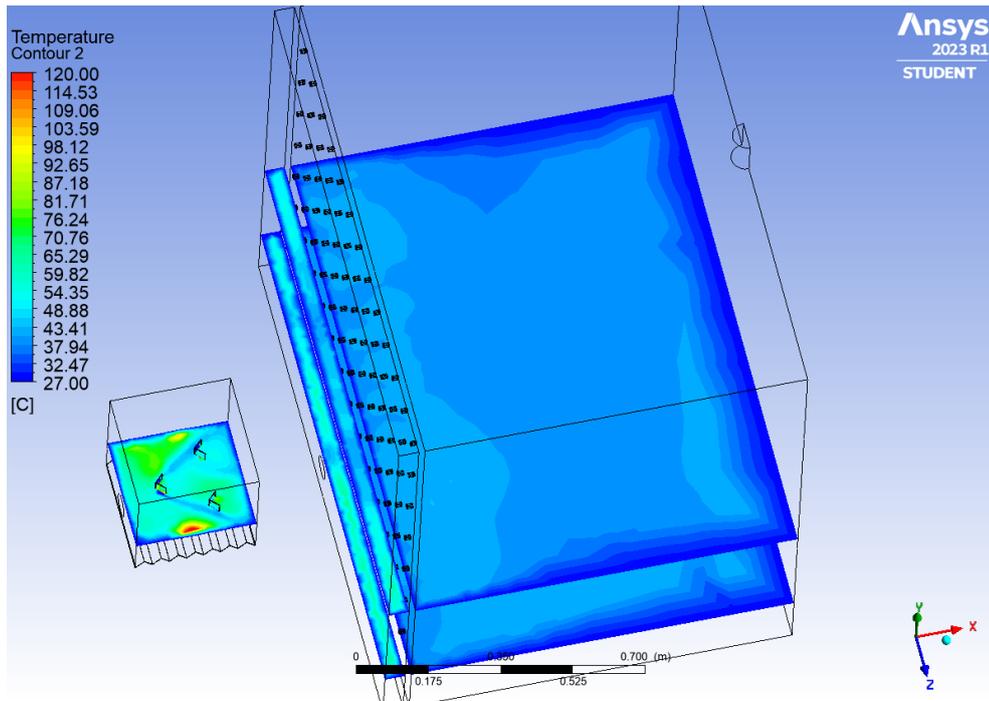
Gambar 4-34 Distribusi Temperatur *Isometric* Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



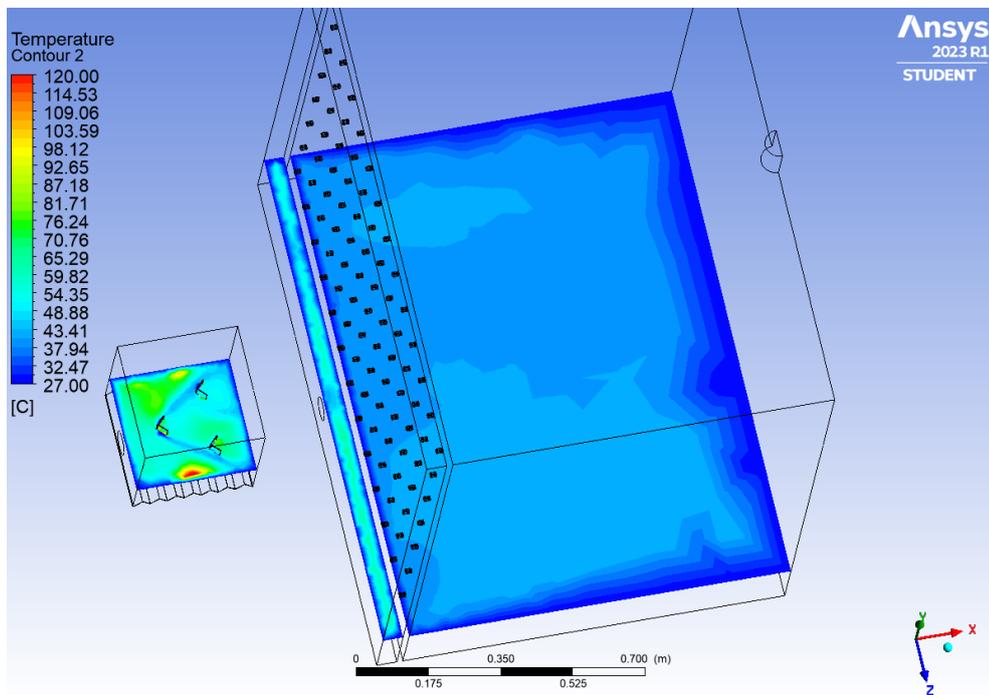
Gambar 4-35 Distribusi Temperatur Tray Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



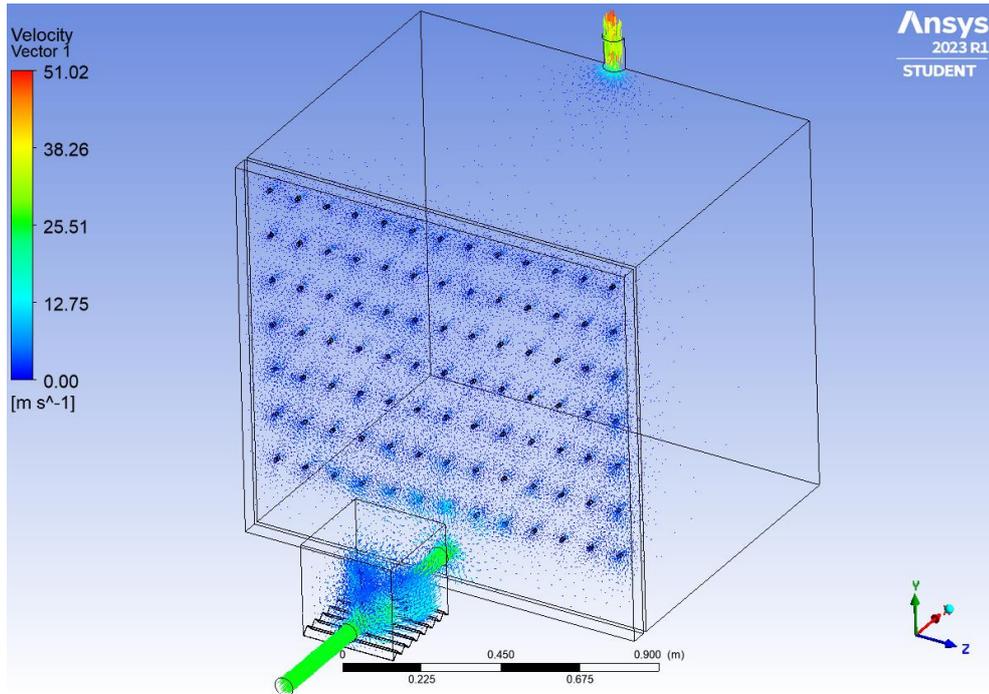
Gambar 4-36 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



Gambar 4-37 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup



Gambar 4-38 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup

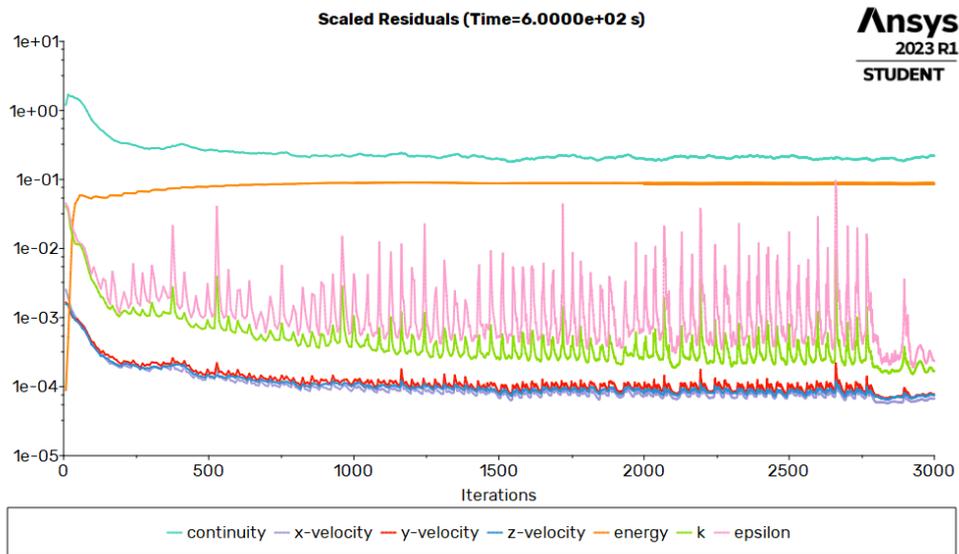


Gambar 4-39 Vektor Kec. 25,91 m/s 1/4 Katup

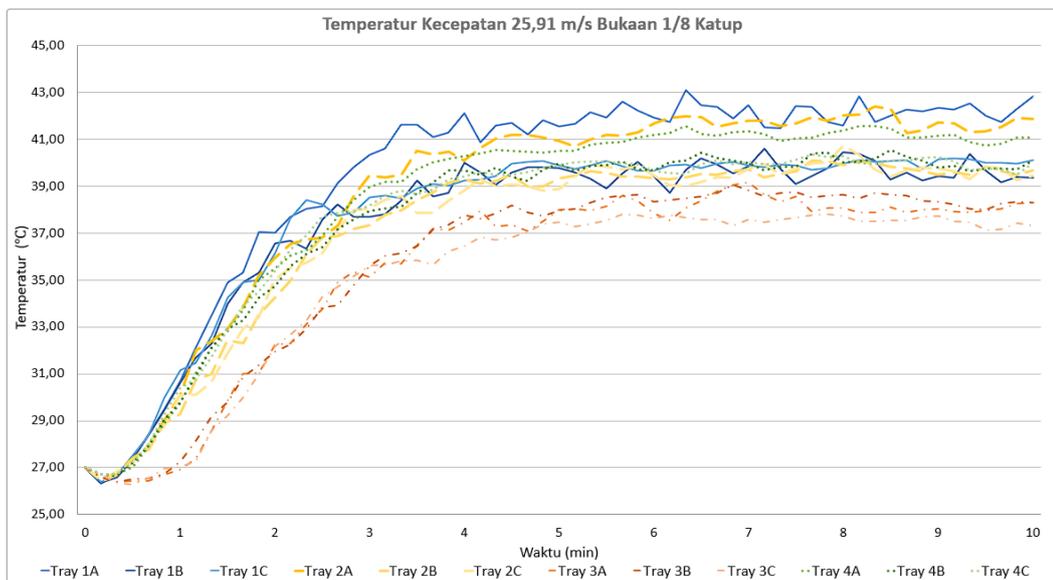
Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu variasi kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/4 katup memiliki temperatur berkisar di 37,97°C-43,59°C. Dimana 37,97°C terjadi pada koordinat 3C, sedangkan 43,59°C terjadi di posisi 1A.

#### 4.1.2.5 Variasi Kecepatan 25,91 m/s Bukaan 1/8 Katup

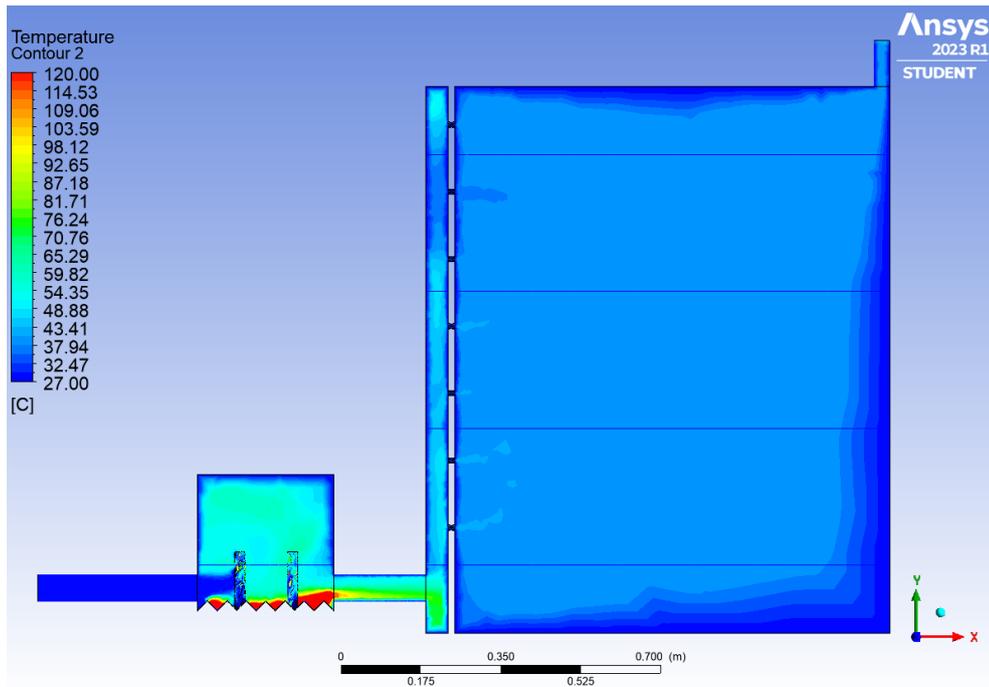
Hasil variasi kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/8 katup didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-40 sampai Gambar 4-48 adalah sebagai berikut.



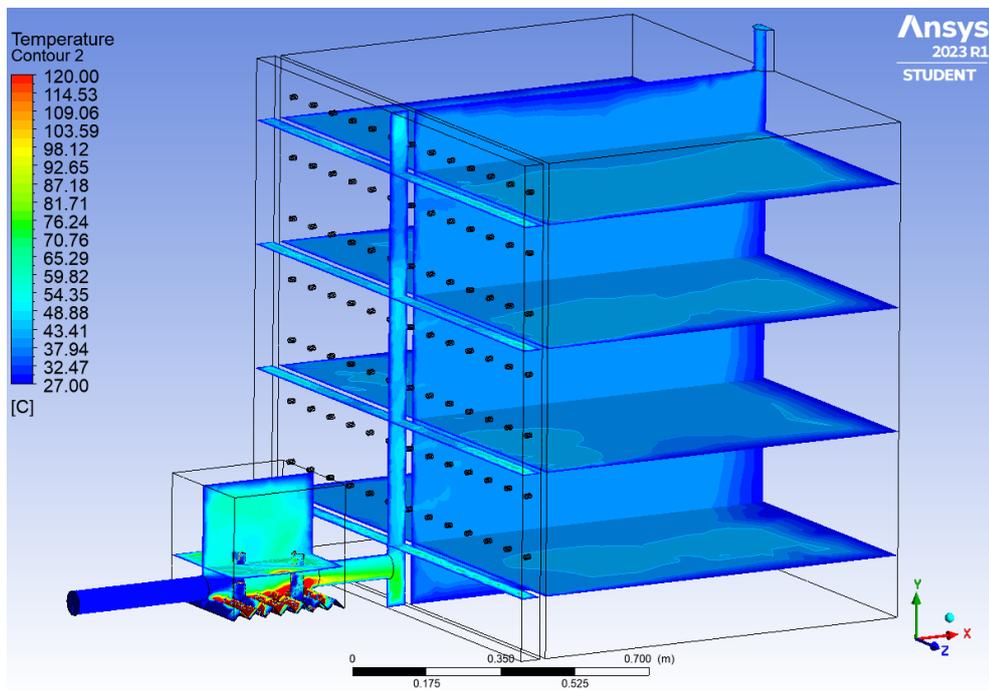
Gambar 4-40 Hasil *Scaled Residuals* Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



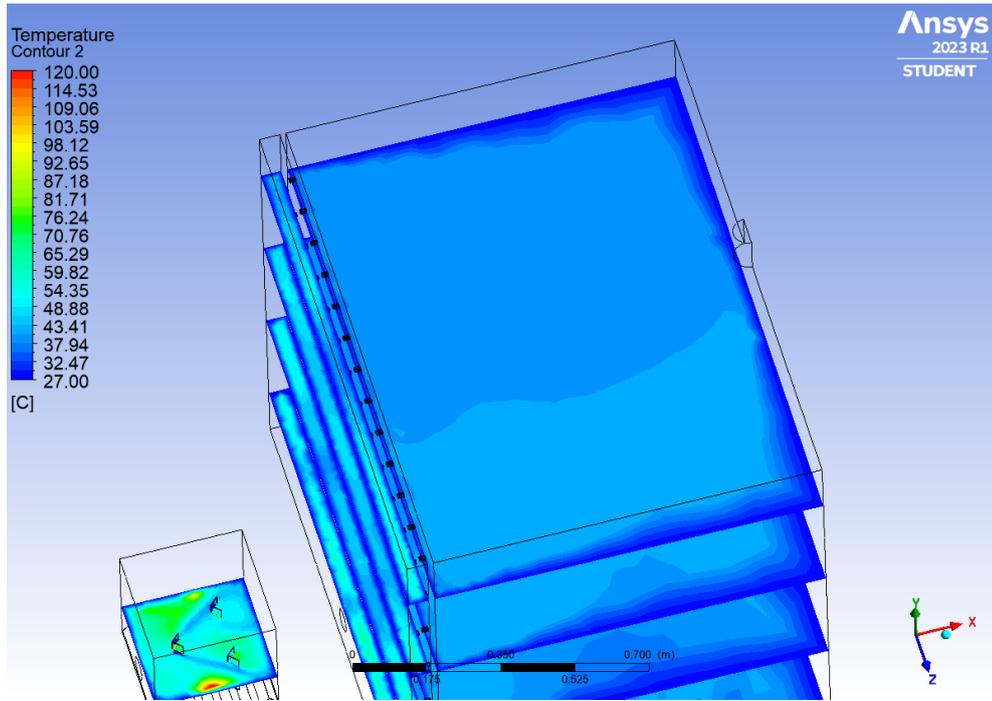
Gambar 4-41 Hasil Temperatur Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



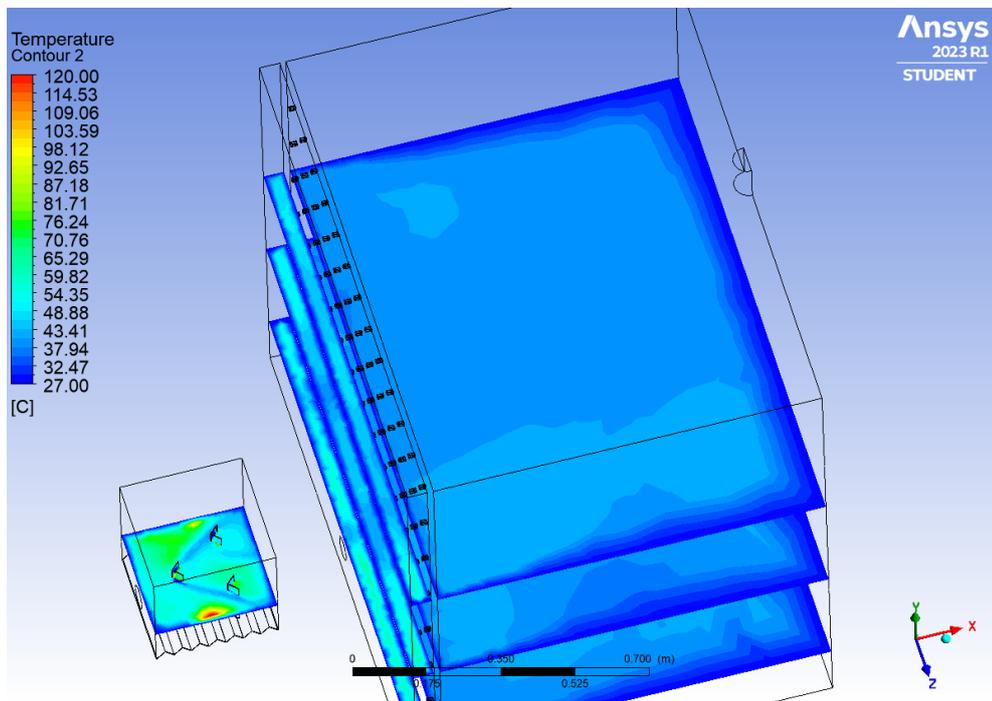
Gambar 4-42 Distribusi Temperatur *Plane XY* Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



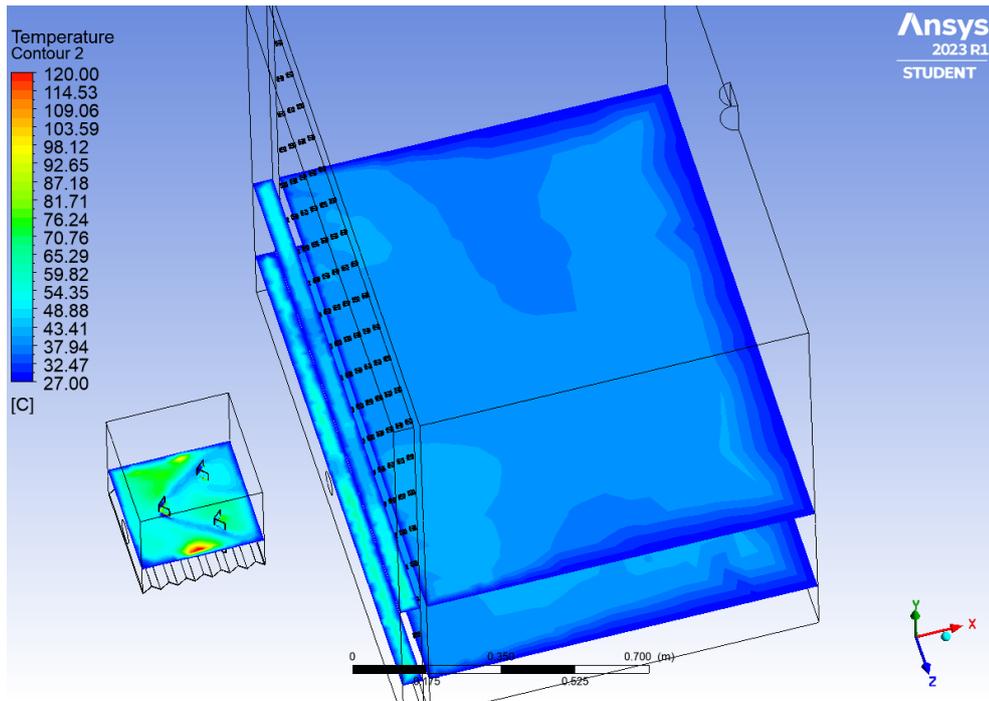
Gambar 4-43 Distribusi Temperatur *Isometric* Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



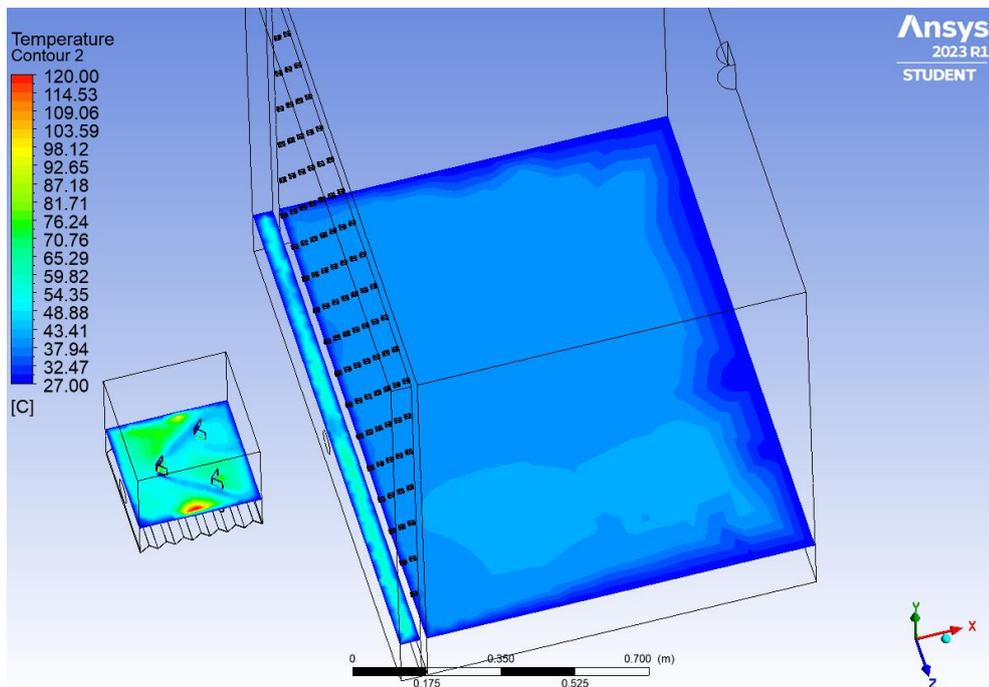
Gambar 4-44 Distribusi Temperatur Tray Ke-1 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



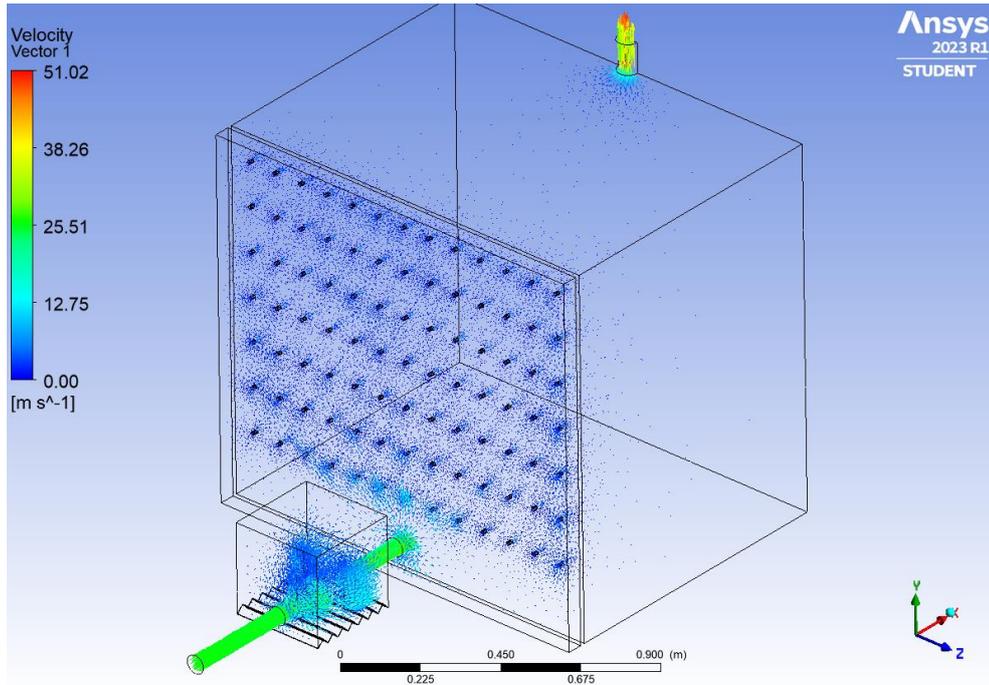
Gambar 4-45 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



Gambar 4-46 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-3 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



Gambar 4-47 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-4 Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup



Gambar 4-48 Vektor Kec. 25,91 m/s 1/8 Katup

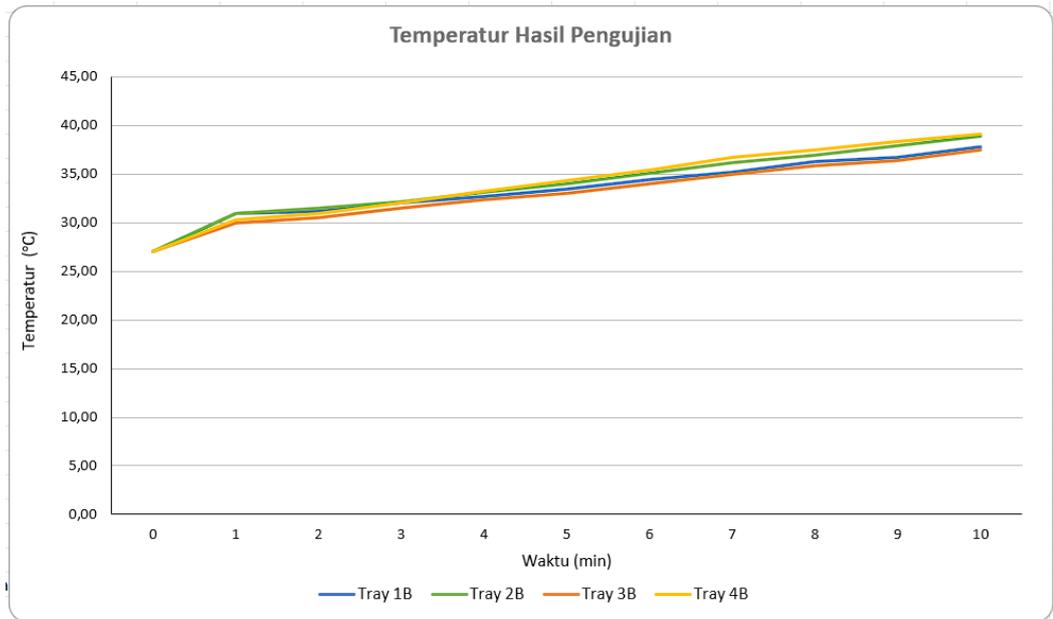
Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu variasi kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/8 katup memiliki temperatur berkisar di 37,33°C-42,83°C. Dimana 37,33°C terjadi pada koordinat 3C, sedangkan 42,83°C terjadi di posisi 1A.

#### 4.1.3 Hasil Pengujian

Hasil pengujian didapatkan temperatur pada *tray* 1B, 2B, 3B, dan 4B setelah tiga kali pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4-2 dan divisualisasikan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-49 sebagai berikut.

Tabel 4-2 Data Pengujian

Waktu (min)	Pengujian Pertama (°C)				Pengujian Kedua (°C)				Pengujian Ketiga (°C)				Rata-Rata (°C)			
	Tray 1B	Tray 2B	Tray 3B	Tray 4B	Tray 1B	Tray 2B	Tray 3B	Tray 4B	Tray 1B	Tray 2B	Tray 3B	Tray 4B	Tray 1B	Tray 2B	Tray 3B	Tray 4B
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
1	29,60	29,70	29,00	28,90	31,30	31,30	29,80	31,00	31,90	31,90	31,20	31,00	30,93	30,97	30,00	30,30
2	29,80	30,40	28,90	29,90	31,80	32,00	31,20	31,60	31,90	31,90	31,50	31,30	31,17	31,43	30,53	30,93
3	30,80	30,80	30,50	31,10	32,50	32,70	32,00	32,50	32,70	33,00	32,00	32,40	32,00	32,17	31,50	32,00
4	31,60	32,30	31,00	32,90	33,70	33,60	33,30	33,60	32,80	33,60	32,60	33,20	32,70	33,17	32,30	33,23
5	32,40	33,20	32,10	34,30	34,10	34,50	33,80	34,50	33,70	34,20	33,20	34,10	33,40	33,97	33,03	34,30
6	33,60	34,50	33,20	35,60	34,80	35,50	34,50	35,70	34,90	35,30	34,40	35,00	34,43	35,10	34,03	35,43
7	34,90	36,00	35,00	36,80	35,60	36,60	35,00	36,90	35,00	36,00	34,90	36,30	35,17	36,20	34,97	36,67
8	35,90	36,60	35,70	38,10	36,50	37,40	36,10	37,70	36,30	36,90	35,80	36,60	36,23	36,97	35,87	37,47
9	36,40	37,90	36,20	38,60	37,20	38,30	36,90	38,70	36,40	37,60	36,10	37,70	36,67	37,93	36,40	38,33
10	37,80	38,80	37,50	39,50	38,00	39,00	37,80	39,50	37,70	38,90	37,20	38,30	37,83	38,90	37,50	39,10

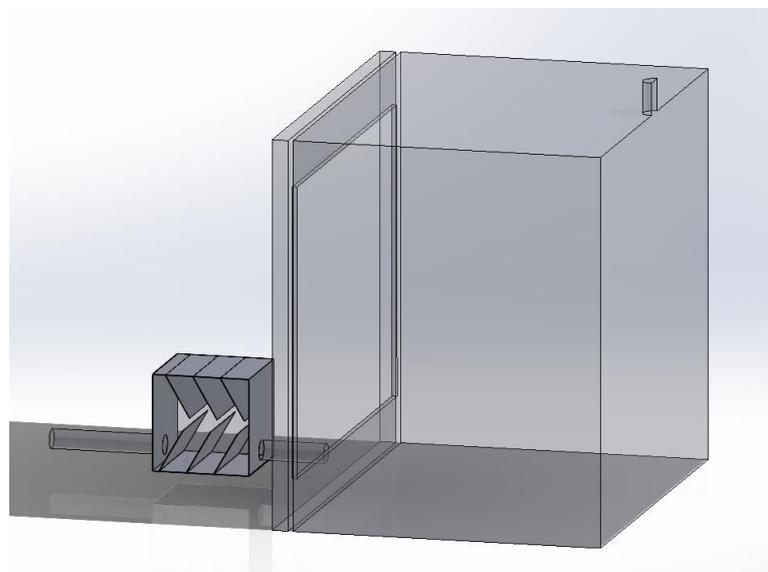


Gambar 4-49 Grafik Hasil Pengujian

## 4.2 Hasil Simulasi Optimasi Desain Alat Pengering Biji Kakao

### 4.2.1 Hasil Pembuatan Optimasi Desain 3D Model

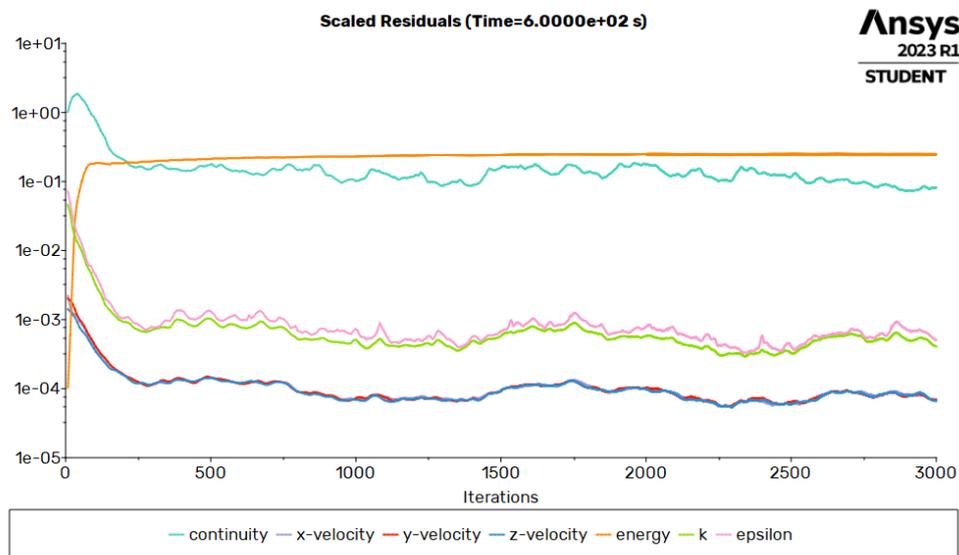
Hasil *design for simulation* dari optimasi desain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-50 sebagai berikut.



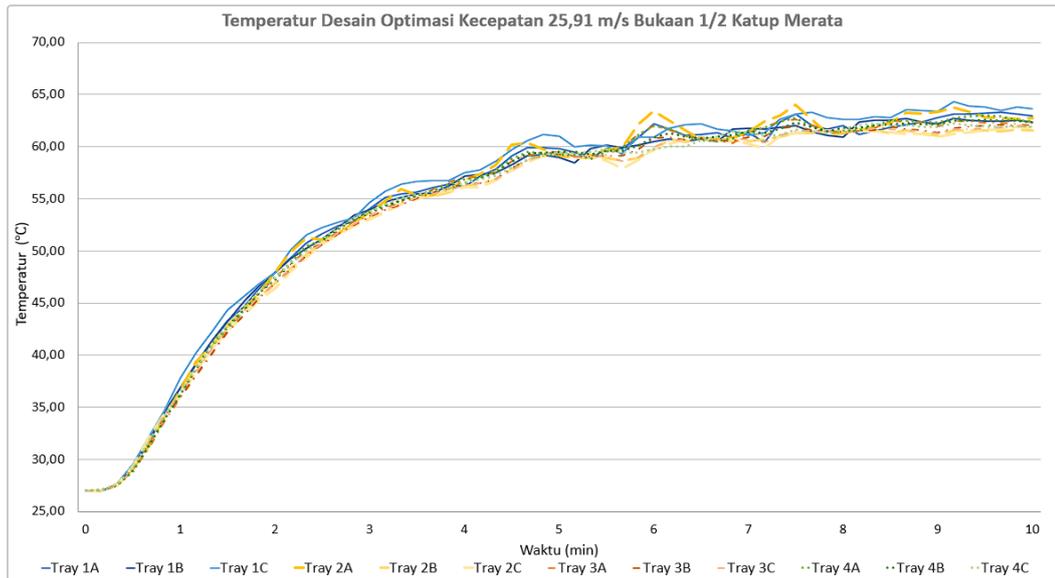
Gambar 4-50 Hasil Optimasi *Design for Simulation*

## 4.2.2 Hasil Simulasi CFD Optimasi Desain

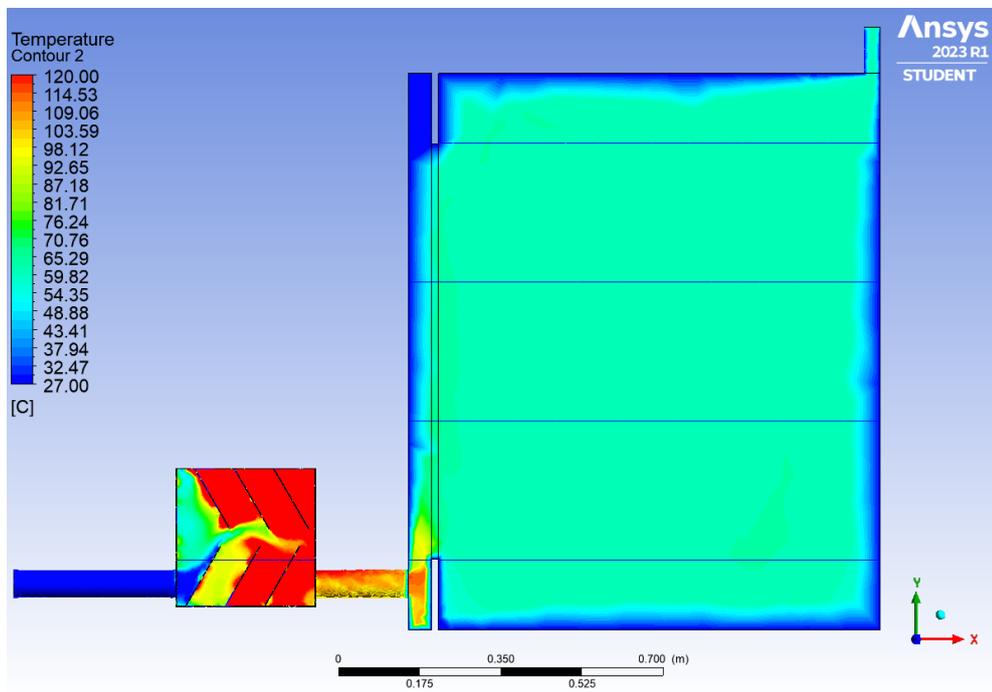
Koordinat yang dilakukan simulasi sama seperti pada desain alat pengering yang sudah ada seperti ditunjukkan pada Gambar 4-3 dan Tabel 4-1 yang sudah dijelaskan pada sebelumnya. Hasil optimasi desain untuk kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dengan nilai *heat flux* merata didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-51 sampai Gambar 4-58 adalah sebagai berikut.



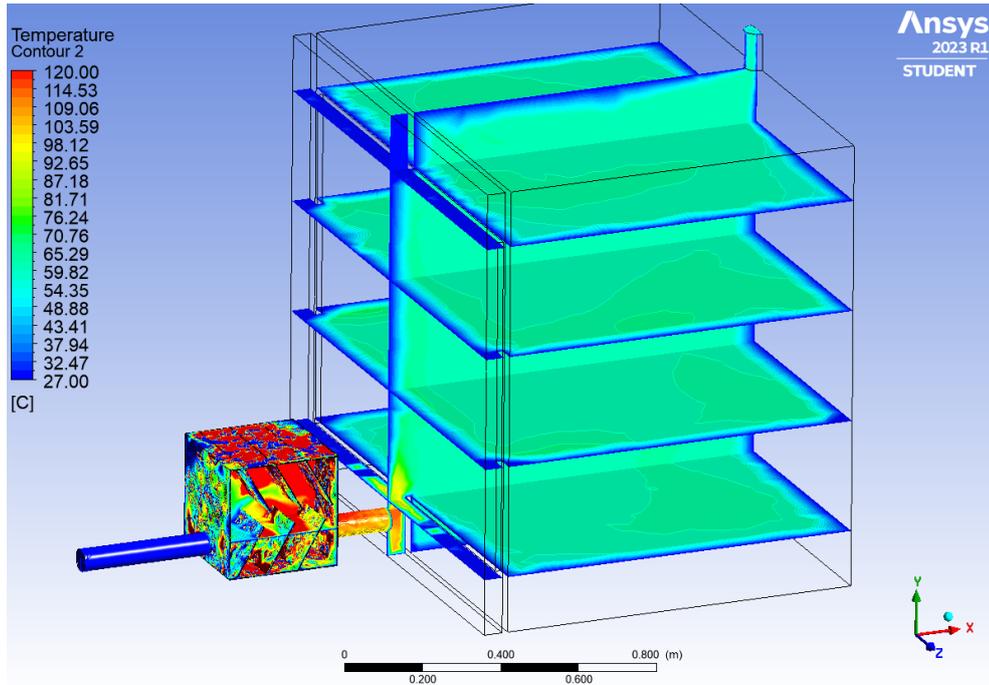
Gambar 4-51 Hasil *Scaled Residuals* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup  
*Heat Flux* Merata



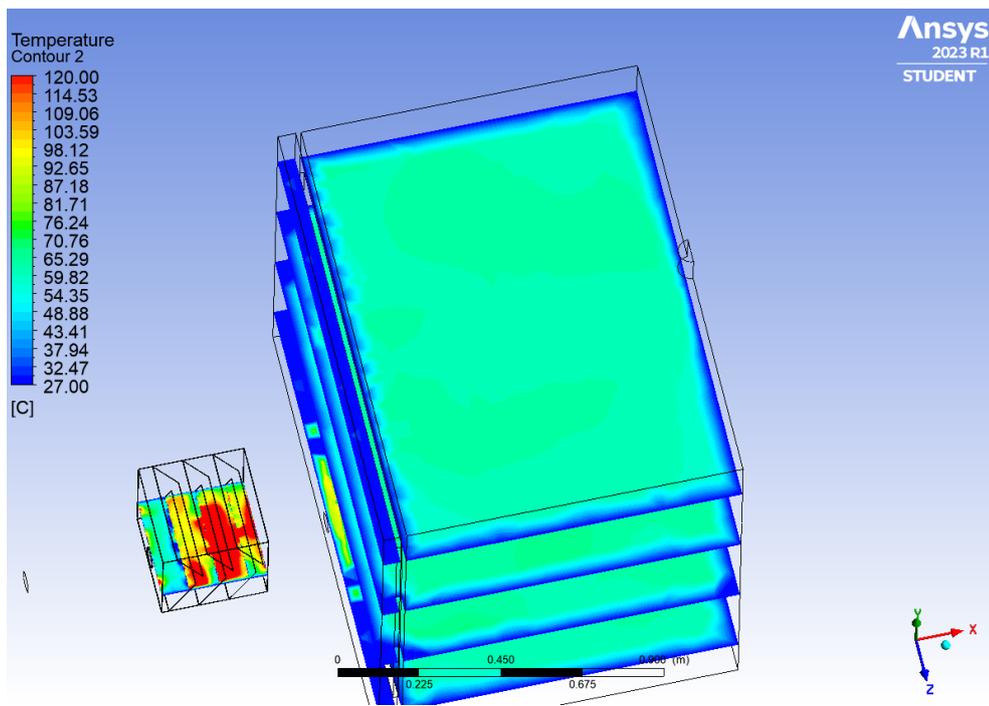
Gambar 4-52 Hasil Temperatur Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup *Heat Flux* Merata



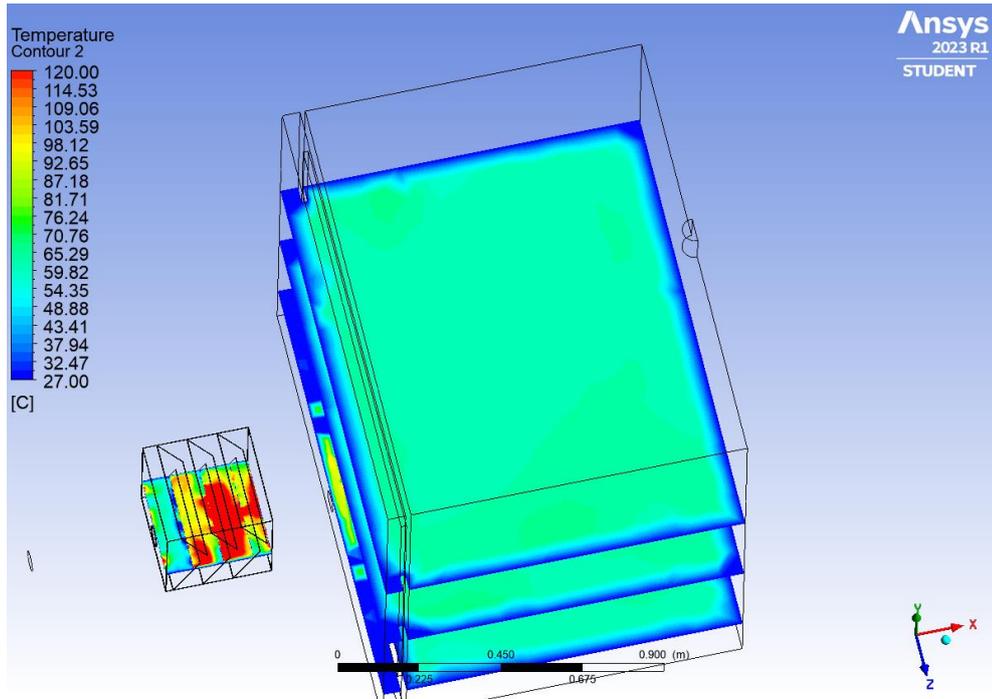
Gambar 4-53 Distribusi Temperatur *Plane XY* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup *Heat Flux* Merata



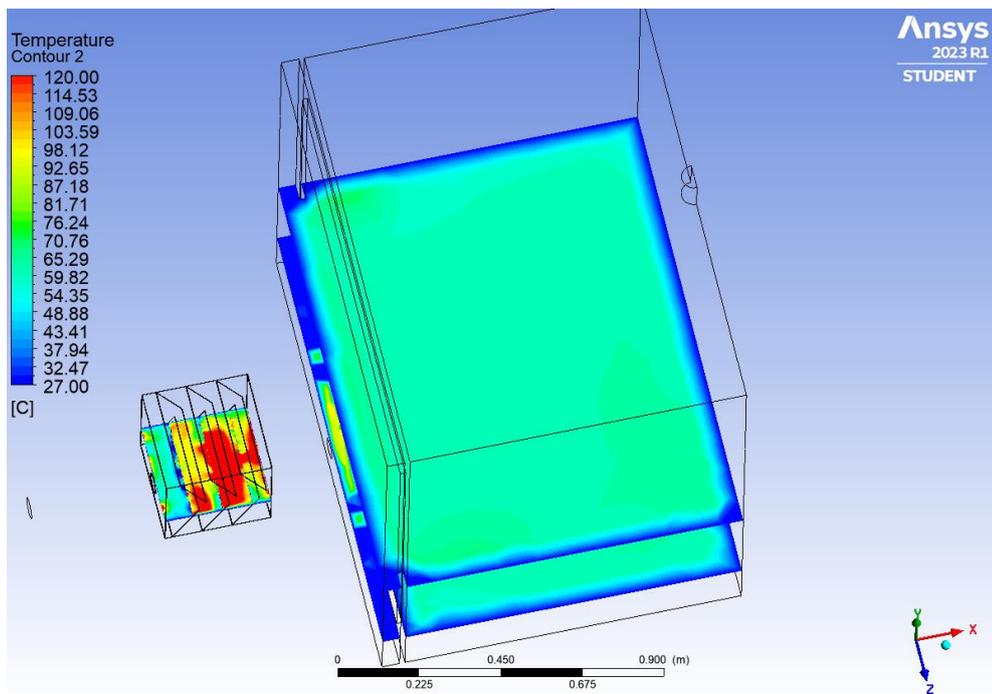
Gambar 4-54 Distribusi Temperatur *Isometric* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Merata



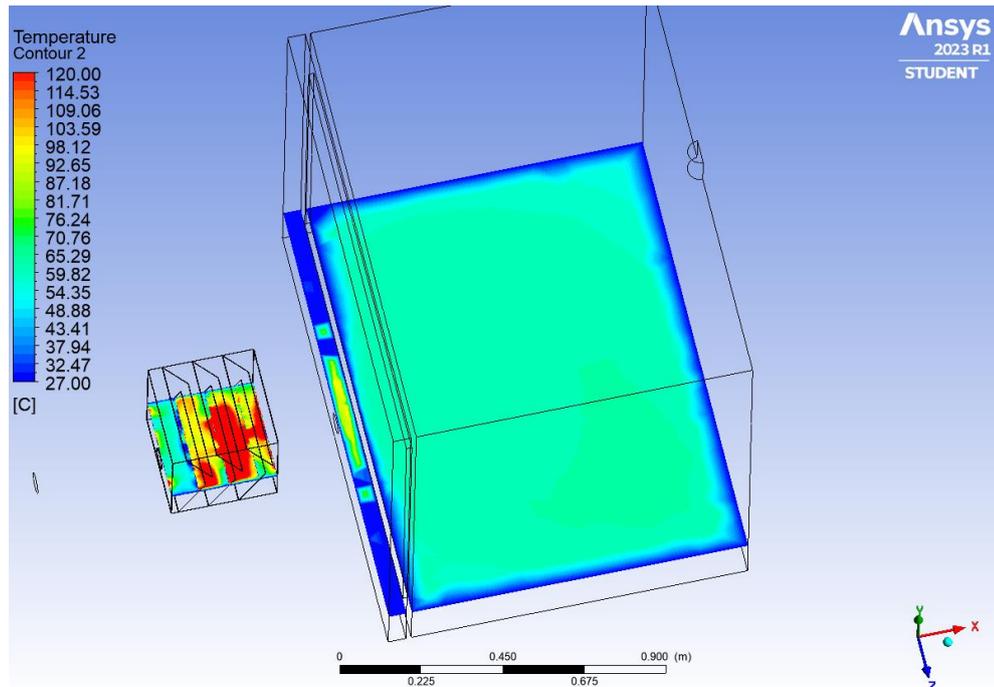
Gambar 4-55 Distribusi Temperatur *Tray* Ke-1 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Merata



Gambar 4-56 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup Heat Flux Merata



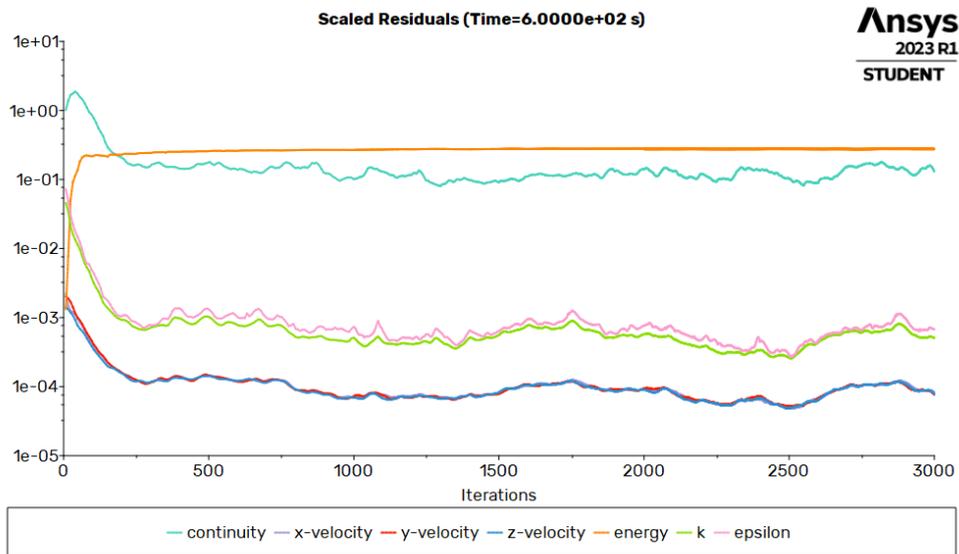
Gambar 4-57 Distribusi Temperatur Tray Ke-3 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup Heat Flux Merata



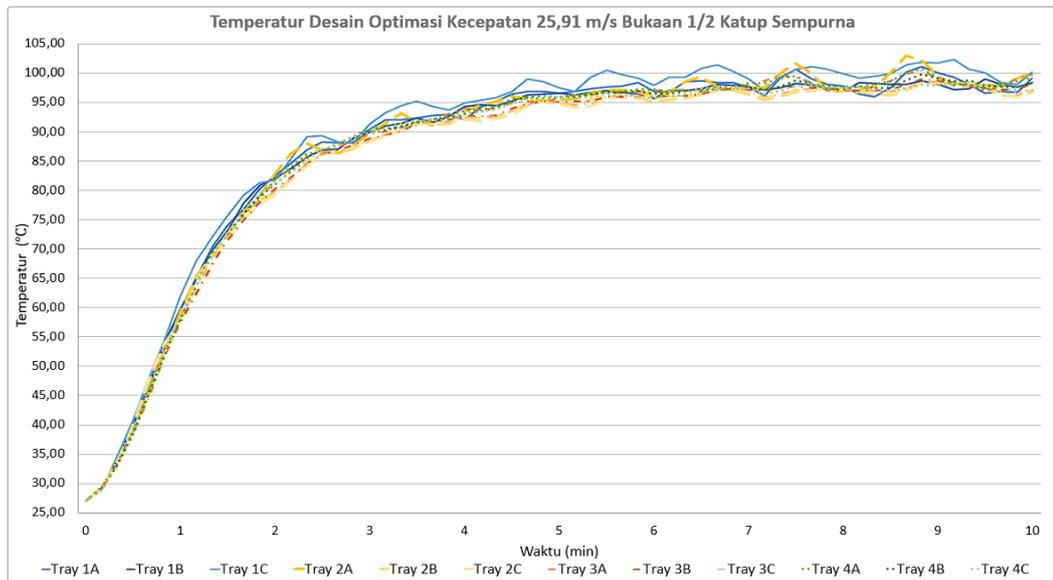
Gambar 4-58 Distribusi Temperatur *Tray* Optimasi Desain Ke-4 Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Merata

Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dengan nilai *heat flux* merata memiliki temperatur berkisar di 61,51°C-62,96°C. Dimana 61,51°C terjadi pada koordinat 2B, sedangkan 62,96°C terjadi di posisi 1A.

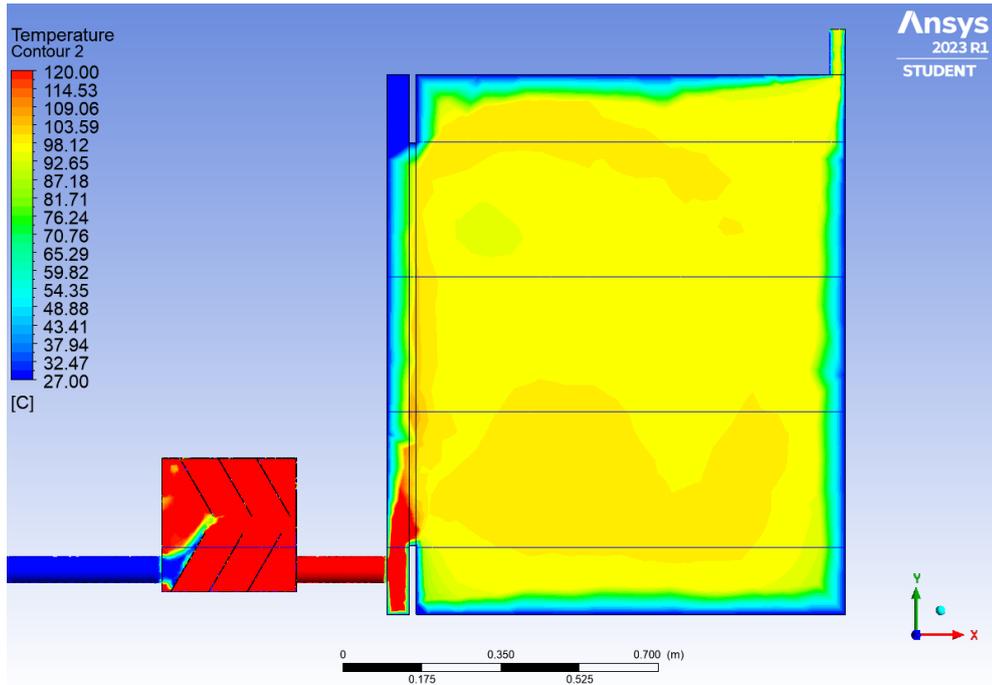
Hasil optimasi desain untuk kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dengan nilai *heat flux* sempurna yang dihasilkan *burner* didapatkan *scaled residuals*, temperatur terhadap waktu, dan distribusi temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-59 sampai Gambar 4-66 adalah sebagai berikut.



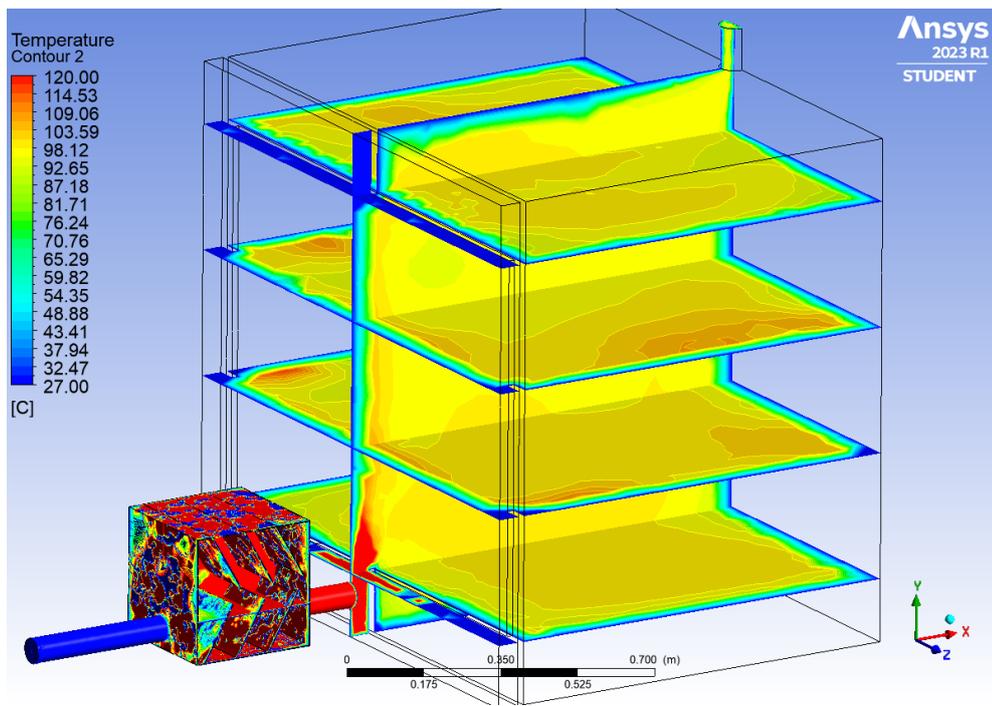
Gambar 4-59 Hasil *Scaled Residuals* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



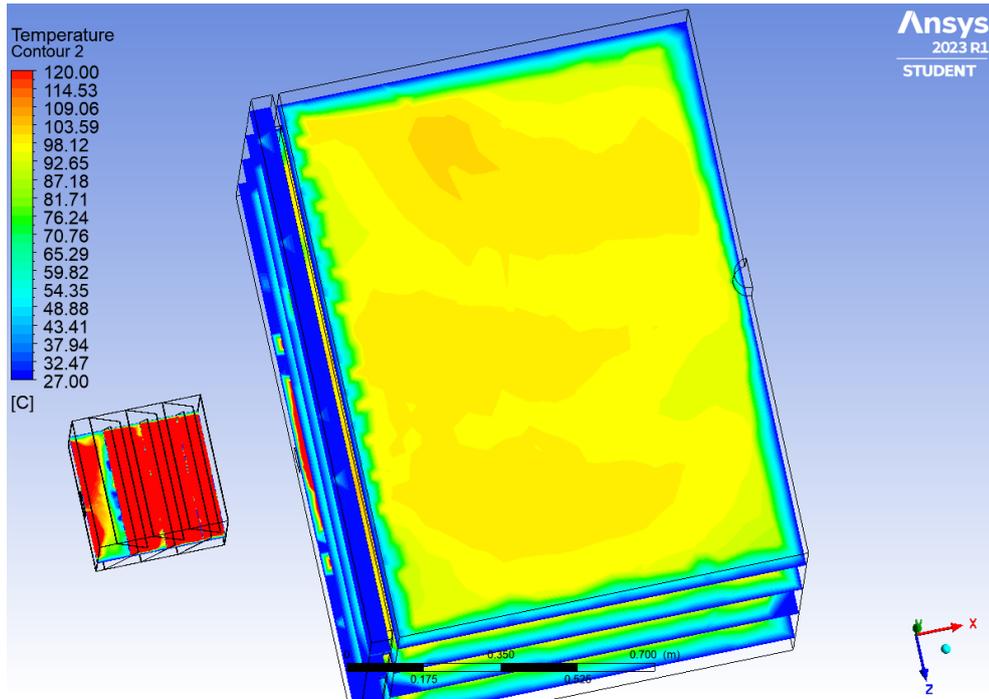
Gambar 4-60 Hasil Temperatur Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



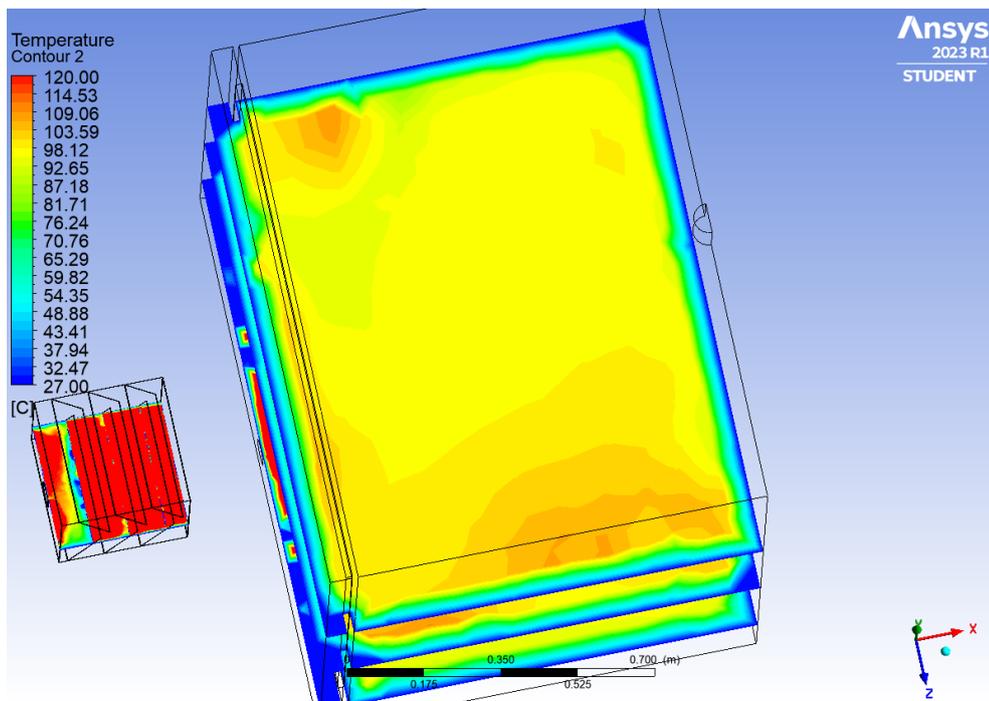
Gambar 4-61 Distribusi Temperatur *Plane XY* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



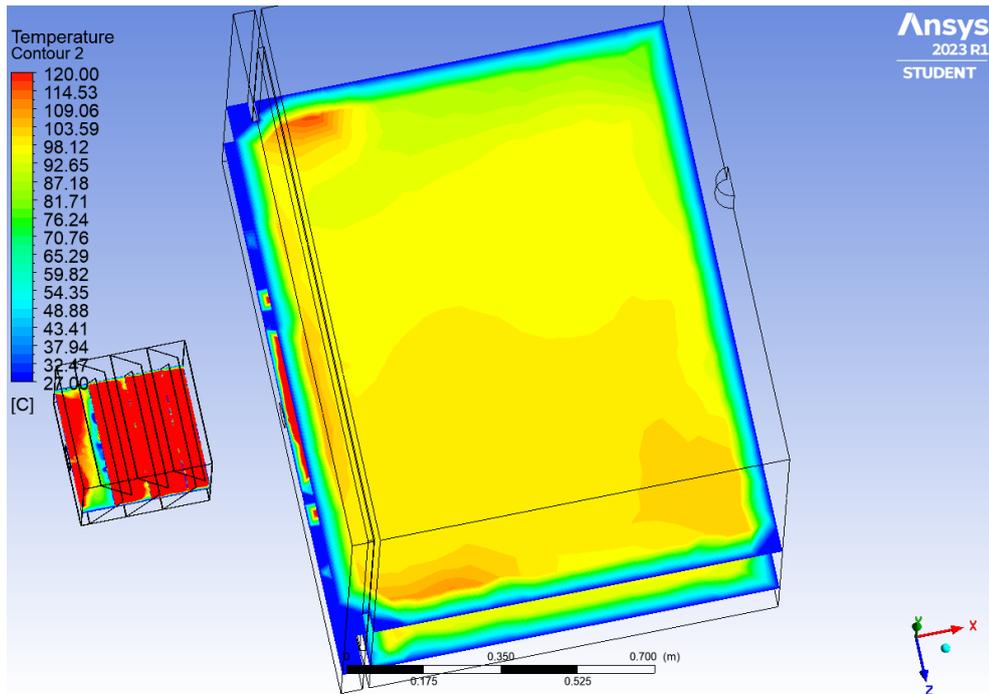
Gambar 4-62 Distribusi Temperatur *Isometric* Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



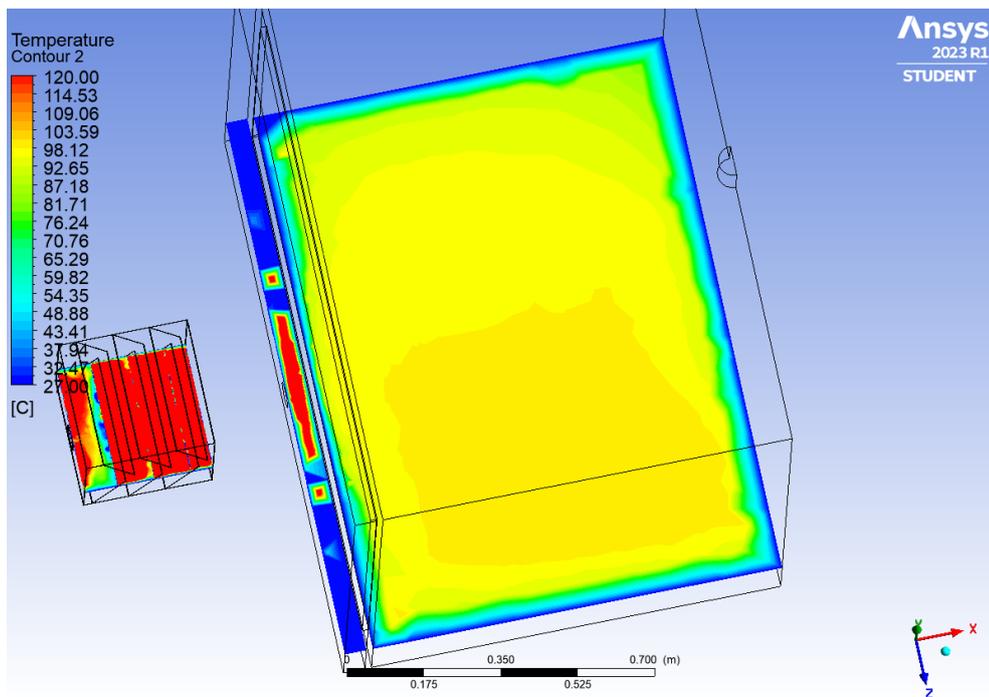
Gambar 4-63 Distribusi Temperatur Tray Ke-1 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



Gambar 4-64 Distribusi Temperatur Tray Ke-2 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna

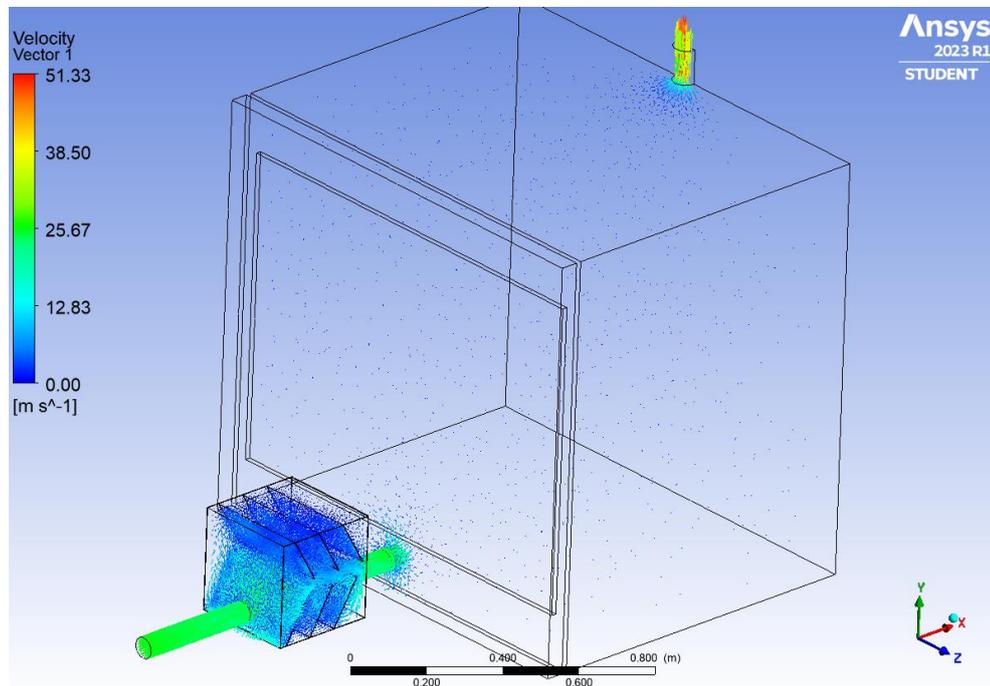


Gambar 4-65 Distribusi Temperatur Tray Ke-3 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna



Gambar 4-66 Distribusi Temperatur Tray Ke-4 Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s  
1/2 Katup *Heat Flux* Sempurna

Setelah melakukan simulasi dengan metode CFD didapatkan data yaitu kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dengan nilai *heat flux* sempurna memiliki temperatur berkisar di 96,78°C-100,22°C. Dimana 96,78°C terjadi pada koordinat 2B, sedangkan 100,22°C terjadi di posisi 1C. Vektor kecepatan dari optimasi desain ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-67 sebagai berikut.

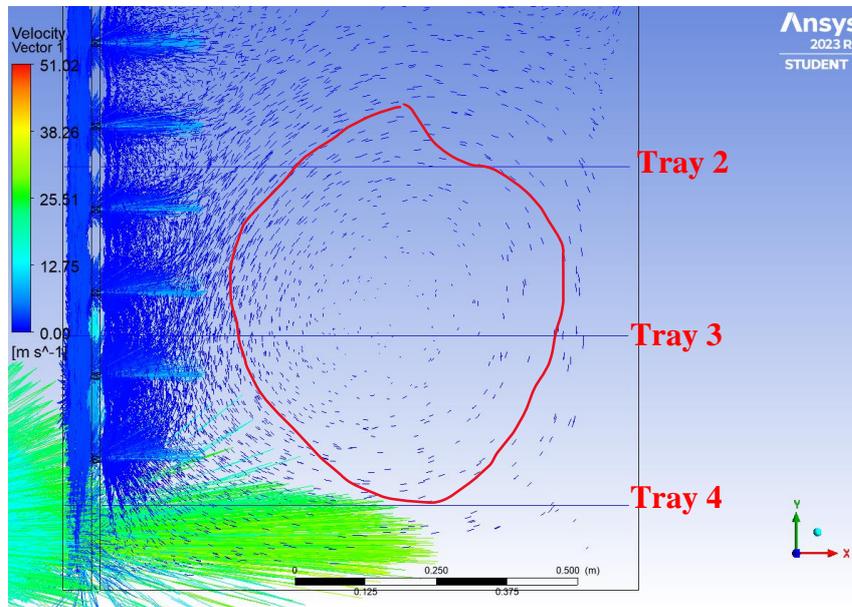


Gambar 4-67 Vektor Optimasi Desain Kec. 25,91 m/s 1/2 Katup Optimasi Desain

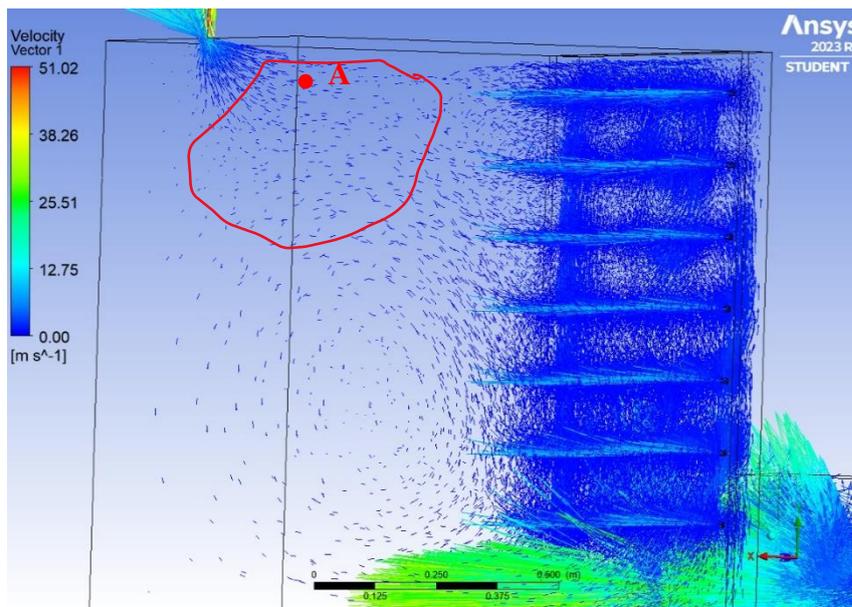
### 4.3 Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi pada subbab 4.1.2 dapat terlihat dengan menggunakan kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup sebagai acuan, dalam waktu 10 menit setelah *steady-state* alat ini belum mampu mencapai temperatur yang sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao. Dapat terlihat juga daerah yang mengalami rata-rata temperatur terendah baik data acuan kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dan seluruh variasi adalah pada *tray* 3. Hal ini disebabkan karena lubang pada *partition wall* paling bawah sejajar dengan *tray* 3. Sehingga saat udara memasuki ruang pengering, maka udara akan terpisah keatas karena letak *outlet* berada diatas dan kebawah karena udara mengisi daerah *tray* 4 yang cukup luas. Hal inilah yang menyebabkan *tray* 3 menjadi lebih rendah

dibandingkan dengan *tray* lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-68 dan Gambar 4-69 dengan *arrow size* sebesar 12 agar terlihat secara visual sebagai berikut.



Gambar 4-68 Analisa 1 Aliran Udara



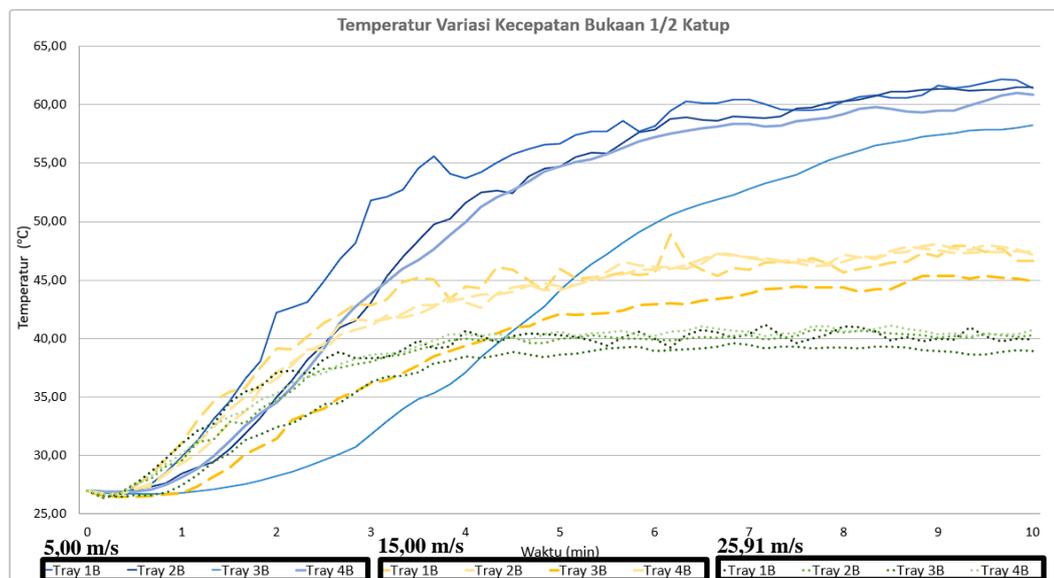
Gambar 4-69 Analisa 2 Aliran Udara

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-69 juga ini yang menyebabkan pada koordinat posisi 1A cenderung lebih tinggi temperaturnya di tiap-tiap variasi

karena alirannya yang berkumpul dari bawah ke atas melalui dekat dinding dan dari lubang partisi bagian atas.

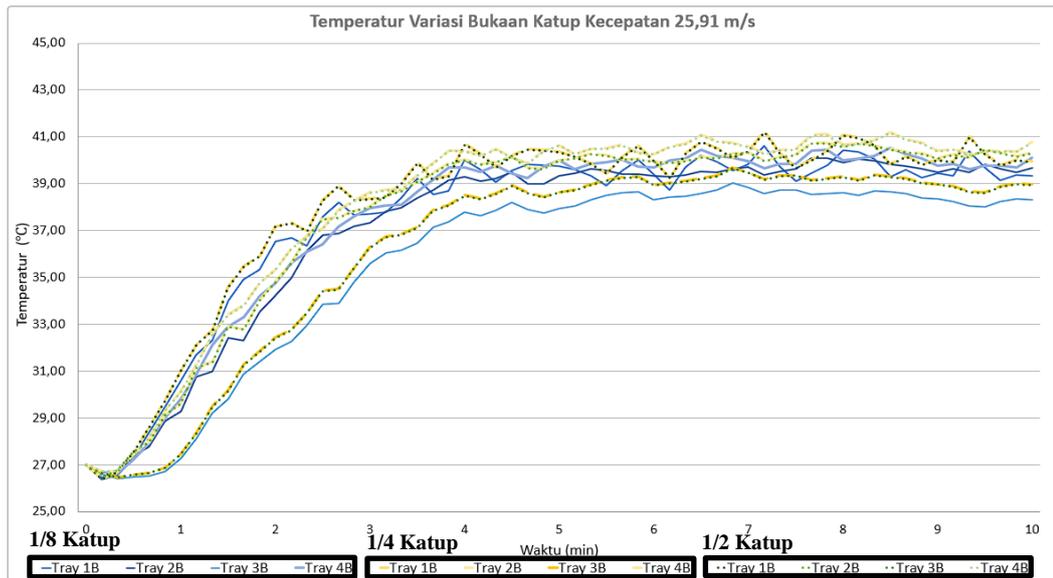
### 4.3.1 Perbandingan Variasi Kecepatan dan Bukaannya Katup

Berdasarkan hasil simulasi pada kecepatan 5,00 m/s, 15,00 m/s, dan 25,91 m/s dengan bukaan 1/2 katup. Dapat disimpulkan semakin rendah kecepatan maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena aliran udara yang bergerak lebih lambat membuat *heat exchanger* lebih mempunyai banyak waktu untuk memanaskan udara tersebut, namun berakibat juga semakin lama untuk mencapai kondisi *steady-state*. Seperti yang ditunjukkan dengan mengambil sampel pada posisi B pada Gambar 4-70 sebagai berikut.



Gambar 4-70 Temperatur Variasi Kecepatan

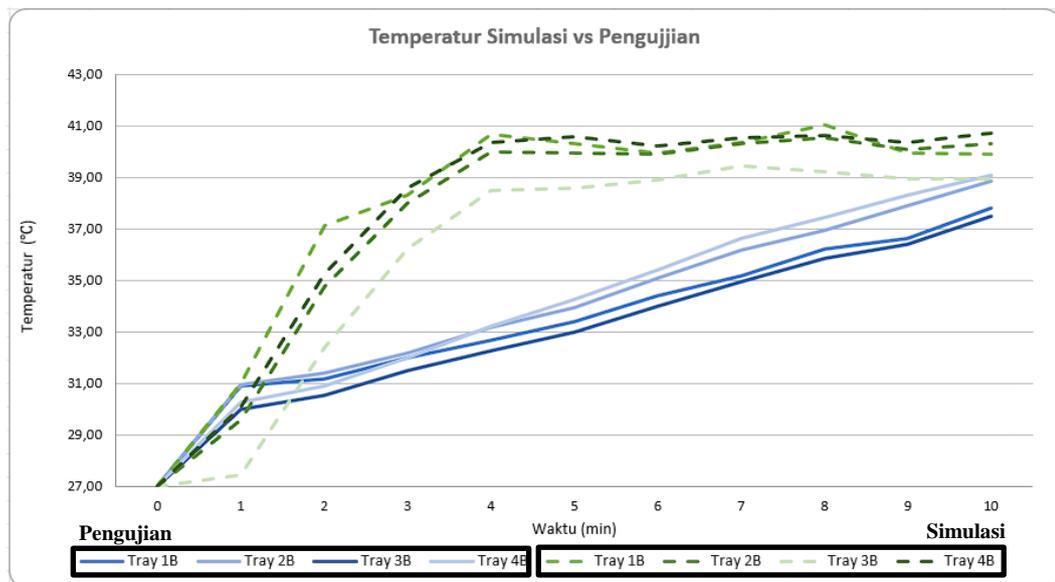
Pada variasi bukaan katup, dapat disimpulkan semakin tinggi nilai *heat flux* maka semakin tinggi juga temperaturnya, dalam hal ini nilai *heat flux* tertinggi adalah pada 1/4 katup. Namun perbedaan hanya selisih sangat sedikit karena nilai *heat flux* juga yang tidak terlalu jauh perbedaannya. Seperti yang ditunjukkan dengan mengambil sampel pada posisi B pada Gambar 4-71 sebagai berikut.



Gambar 4-71 Temperatur Variasi Bukaannya Katup

### 4.3.2 Perbandingan Simulasi dan Pengujian

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian yang sudah dilakukan didapatkan perbedaan pada kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup berkisar 5%-9% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-72 sebagai berikut.



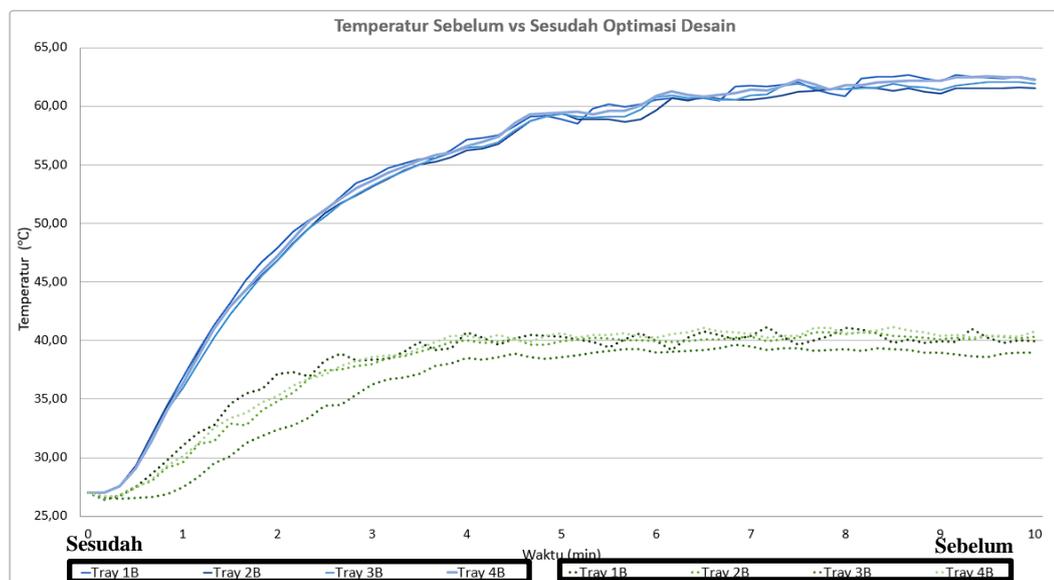
Gambar 4-72 Perbandingan Simulasi dan Pengujian

Perbedaan terjadi disebabkan hasil simulasi merupakan kondisi ideal dimana semua prinsip dari aliran fluida yang mengalir dan energi terpenuhi.

Sedangkan, pada hasil pengujian tidak selalu mengalami kondisi ideal seperti salah satunya adalah masih banyak terjadinya kebocoran udara pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* tersebut. Namun, melihat dari *trend* temperaturnya terlihat kesamaan dimana *tray 3* selalu menjadi paling rendah temperaturnya.

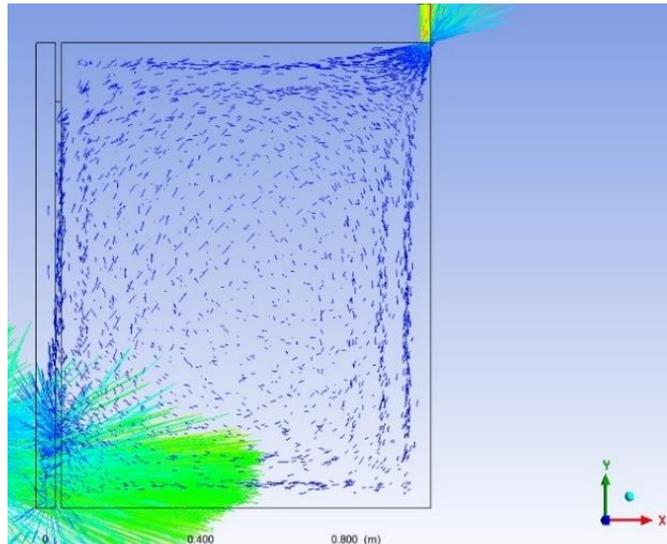
### 4.3.3 Perbandingan Optimasi Desain

Berdasarkan hasil simulasi antara desain realita dan desain yang sudah ditingkatkan kemampuannya dimana simulasi dilakukan dengan data acuan yaitu kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup. Didapatkan terjadi peningkatan hingga 37,00% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-73 dengan mengambil sampel pada posisi B sebagai berikut.



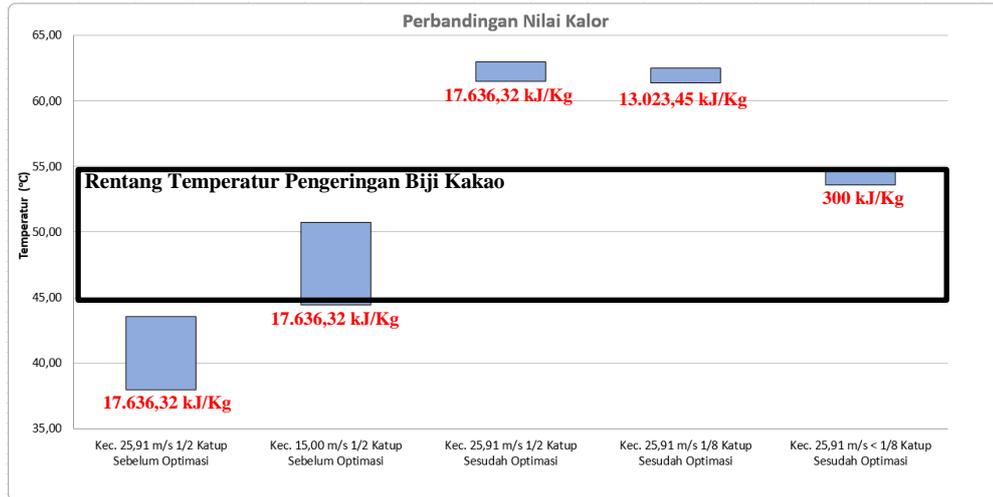
Gambar 4-73 Temperatur Sebelum dan Sesudah Optimasi

Selain itu, distribusi temperaturnya juga menjadi lebih merata dikarenakan arah aliran kecepatan udara yang lebih merata dibandingkan dengan sebelumnya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-74 dengan *arrow size* sebesar 12 sebagai berikut.



Gambar 4-74 Aliran Udara Optimasi Desain

Perbandingan kalor yang digunakan untuk mencapai temperatur yang optimal sesuai dengan karakteristik pengeringan biji kakao sebelum dilakukan optimasi adalah dengan menggunakan variasi yang paling sesuai yaitu kecepatan 15,00 m/s bukaan 1/2 katup atau menggunakan nilai kalor sebesar 17.636,32 kJ/Kg. Namun, dengan dilakukannya optimasi desain pada kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dan 1/8 katup dapat melebihi karakteristik pengeringan biji kakao sehingga penggunaan energi bisa dikurangi menjadi kurang dari 1/8 katup atau kurang dari 13.023,45 kJ/Kg. Setelah dilakukan simulasi untuk mendapatkan berapa nilai kurang dari 13.023,45 kJ/Kg tersebut didapatkan nilai kalor yaitu 300 kJ/Kg dengan waktu mencapai *steady-state* selama 5 menit. Hal ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4-75 sebagai berikut.



Gambar 4-75 Perbandingan Penggunaan Kalor

Hal ini menunjukkan jika alat pengering di modifikasi menggunakan yang sudah dioptimasi, untuk mencapai temperatur yang sesuai dengan karakteristik dari biji kakao dapat menurunkan penggunaan energi dalam hal ini gas LPG yang digunakan. Sehingga selain alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini memudahkan petani dalam mengeringkan biji kakao juga dapat menghemat biaya dari operasional alat pengering tersebut.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* dapat mengeringkan biji kakao karena terdapat fenomena aliran udara yang mengalir dimana itu adalah persamaan momentum dan kontinuitas juga terdapat fenomena perpindahan kalor dalam hal ini adalah persamaan konveksi paksa dikarenakan adanya aliran fluida, gaya pendorong fluida dari eksternal, dan adanya perbedaan temperatur pada dua media yang mengalami konveksi.
2. Parameter-parameter yang dipertimbangkan ketika melakukan analisis perpindahan kalor menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini adalah pendefinisian dari karakteristik fluida dan *governing equation* yang berguna untuk menentukan *boundary condition*. Selain itu, pada *pre-processing* diperlukan memperhatikan *mesh quality* baik *orthogonal quality* maupun *skewness quality*.
3. Kemampuan dari alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini dengan kecepatan 25,91 m/s bukaan 1/2 katup dapat mencapai kondisi *steady-state* kurang dari 10 menit, namun temperatur yang didapatkan belum sesuai dengan karakteristik pengeringan dari biji kakao. Untuk menaikkan temperatur tersebut dapat dilakukan dengan menurunkan kecepatan aliran udara ataupun bisa dengan menaikkan nilai *heat flux* pada bukaan katup. Setelah dilakukan optimasi desain pada bagian *heat wall* dan *partition wall* alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* ini dapat lebih hemat dalam penggunaan energi karena dengan bukaan katup yang sama temperatur yang dihasilkan dapat lebih tinggi hingga 37,00%, selain itu distribusi temperaturnya juga menjadi lebih merata.

## 5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Dalam mendapatkan kecepatan udara perlu dilakukan pengujian secara langsung namun dengan alat pengujian yang dapat mengukur sistem tertutup.
2. Dalam mendapatkan nilai *heat flux* perlu dilakukan pengujian nilai kalor secara langsung dengan alat pengujian yang sesuai.
3. Alat pengering biji kakao tipe *tray dryer* saat ini perlu dilakukan meminimalisir kebocoran udara dan mengganti saluran udara menjadi *rigid* agar aliran udaranya lebih baik.
4. Penggunaan perangkat lunak *Ansys* diharapkan tidak menggunakan *student license* agar tidak terbatas jumlah *mesh* mengingat geometri dari alat yang cukup besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allison, C. (2020, April 1). *Meshing in FEA: Structured vs Unstructured meshes*. Onscale. <https://onscale.com/meshing-in-fea-structured-vs-unstructured-meshes/>
- Al-Sammarraie, A. T., & Vafai, K. (2017). Heat transfer augmentation through convergence angles in a pipe. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 72(3), 197–214. <https://doi.org/10.1080/10407782.2017.1372670>
- Anderson, J. D. (1992). Governing Equations of Fluid Dynamics. Dalam J. F. Wendt (Ed.), *Computational Fluid Dynamics: An Introduction* (hlm. 15–51). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-11350-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-11350-9_2)
- Anderson, J. D. (2007). *Fundamentals of Aerodynamics* (4th ed.). McGraw–Hill.
- ANSYS. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide* (15.0). ANSYS, Inc.
- Badan Pusat Statistik. (2021). Statistik Kakao Indonesia 2021. Dalam *BPS RI*. BPS RI.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011a). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (L. Ratts, Ed.; 7th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011b). *Introduction to Heat Transfer* (Sixth). John Wiley & Sons, Inc.
- Bern, M., & Plassmann, P. (2000). Mesh Generation. Dalam J.-R. Sack & J. Urrutia (Ed.), *Handbook of Computational Geometry* (hlm. 291–332). North-Holland. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044482537-7/50007-3>
- Cahyaningrum, N., Safitri, A., Kobarsih, M., Fajri, M., Marwati, D. T., Teknologi, B. P., & Yogyakarta, P. (2019). KAJIAN PENGERINGAN BIJI KAKAO HASIL PANEN AKHIR MUSIM DI GUNUNGKIDUL YOGYAKARTA. *Research Fair Unisri 2019*, 3(1).
- Camu, N., De Winter, T., Addo, S. K., Takrama, J. S., Bernaert, H., & De Vuyst, L. (2008). Fermentation of ocoa beans: Influence of microbial activities and polyphenol concentrations on the flavour of chocolate. *Journal of the*

- Science of Food and Agriculture*, 88(13), 2288–2297.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.3349>
- Castillo, J. E. (1991). *Mathematical Aspects of Numerical Grid Generation* (J. E. Castillo, Ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics.  
<https://doi.org/10.1137/1.9781611971019>
- Castillo-Orozco, E., Garavitto, O., Saavedra, O., & Mantilla, D. (2023). The Drying Kinetics and CFD Multidomain Model of Cocoa Bean Variety CCN51. *Foods*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/foods12051082>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (Fourth ed.). McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Turner, R. H. (2017). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* (Fifth Ed.). McGraw-Hill Education.
- Engineers Edge. (t.t.). *Convective Heat Transfer Convection Equation and Calculator*. Engineers Edge, LLC. Diambil 14 Juli 2023, dari [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/convection.htm](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convection.htm)
- Fanchi, J. R., & Christiansen, R. L. (2016). *Introduction to Petroleum Engineering* (1st ed.). John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781119193463>
- Fatchurrohman, N., & Chia, S. T. (2017). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012060>
- Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Belahcen, A., & Vaimann, T. (2019). Determination of Heat Transfer Coefficient for the Air Forced Cooling Over a Flat Side of Coil. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 15(1), 15–20. <https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0003>
- Hatmi, R. U., & Rustijarno, S. (2012). *Teknologi Pengolahan Biji Kakao Menuju SNI Biji Kakao 01-2323-2008*. BPTP DIY.

- Hayati, R., Yusmanizar, Mustafiril, & Fauzi, H. (2012). Kajian Fermentasi dan Suhu Pengeringan pada Mutu Kakao (*Theobroma cacao* L.). *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 26(2).
- Hendrawan, B. A. (2018). *Analisis Proses Pengeringan Kacang Panjang pada Mesin Pengering Tipe Tray Kapasitas 20 KG*. Universitas Islam Indonesia.
- Hirsch, C. (2007). Numerical Computation of Internal and External Flows. Dalam C. Hirsch (Ed.), *Numerical Computation of Internal and External Flows (Second Edition)* (Second Edition). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075066594-0/50038-2>
- Holman, J. P., & Jasjfi, E. (1995). *Perpindahan Kalor*. Erlangga.
- Huc, N. (2014, Januari 6). *Conjugate Heat Transfer*. COMSOL Blog. <https://www.comsol.com/blogs/conjugate-heat-transfer/>
- Imami, Y. N. A. (2018). *Desain dan Pembuatan Alat Pengering Bibit Kacang Panjang Tipe Tray Dryer yang Ergonomis dengan Mobilitas Tinggi*. Universitas Islam Indonesia.
- Jamaluddin. (2018). *Perpindahan Panas dan Massa pada Penyangraian dan Penggorengan Bahan Pangan* (Pertama). Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar.
- Kemenperin. (2022). *Menperin: Potensi Komoditas Perkebunan Masih Tinggi*. <https://www.kemenperin.go.id/artikel/23593/Menperin:-Potensi-Komoditas-Perkebunan-Masih-Tinggi>
- MatWeb. (t.t.). *Overview of Materials for Low Carbon Steel*. MatWeb, LLC. Diambil 25 Mei 2023, dari <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=034970339dd14349a8297d2c83134649&ckck=1>
- Mavriplis, D. J. (1996). Mesh Generation and adaptivity for complex geometries and flows. Dalam R. Peyret (Ed.), *Handbook of Computational Fluid Mechanics* (1st ed.). Academic Press.
- Meriadi, Meliala, S., & Muhammad. (2018). *Perencanaan dan Pembuatan Alat Pengering Biji Coklat dengan Wadah Putar Menggunakan Pemanas Listrik*. Universitas Malikussaleh.

- Narayan, K. L., Rao, K. M., & Sarcar, M. M. M. (2008). *Computer Aided Design and Manufacturing*. Prentice-Hall of India Private Limited.
- National Physical Laboratory. (2018). *Calculation of Speed of Sound*. <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/speedair/>
- Nawawi, M., Aria, K., & Utama, P. (2015). *FINAL PROJECT-MN 141581 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSIS INTO THE EFFECT OF INCLINING KEEL ON THE RESISTANCE AND SPEED OF MONOHULL FISHING VESSEL*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. Dalam *Bioresource Technology* (Vol. 98, Nomor 12, hlm. 2386–2414). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Pachpute, S. N. (2022). *An Introduction To Computational Fluid Dynamics (CFD)*. CFD Flow Engineering. [https://cfdflowengineering.com/basics-of-cfd-modeling-for-beginners/#\\_Introduction\\_to\\_Flow\\_Analysis\\_Techniques](https://cfdflowengineering.com/basics-of-cfd-modeling-for-beginners/#_Introduction_to_Flow_Analysis_Techniques)
- Pambudi, M. R. (2017). *PENGARUH VARIASI BUKAAN KATUP GAS PADA DEBIT ALIRAN 2 AIR LPM TERHADAP NILAI KALOR DAN EFISIENSI FLOW CALORYMETER DENGAN BAHAN BAKAR LPG*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Putri, D. N. (2021). KARAKTERISTIK BIJI KAKAO (*Theobroma cacao* L.) HASIL FERMENTASI DENGAN UKURAN WADAH BERBEDA. *Jurnal Viabel Pertanian*, 15(1), 32–44.
- Rama Murthy, S., & Mani, M. (2012). Design for sustainability: The role of CAD. Dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Nomor 6, hlm. 4247–4256). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.009>
- Ramnath, S., Haghghi, P., Venkiteswaran, A., & Shah, J. J. (2020). Interoperability of CAD geometry and product manufacturing information for computer integrated manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(2), 116–132. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1718760>

- Salama, A. (2021). Velocity profile representation for fully developed turbulent flows in pipes: A modified power law. *Fluids*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/fluids6100369>
- Sidabariba, N. W., Rohanah, A., & Daulay, S. B. (2017). Uji Variasi Suhu Pengeringan Biji Kakao dengan Alat Pengering Tipe Kabinet terhadap Mutu Bubuk Kakao (Drying Temperature Test of Cocoa beans on Cocoa Powder Quality Using a Cabinet Dryer). *Keternakan Pertanian J.Rekayasa Pangan dan Pert*, 5.
- SimScale. (2023, September 16). *Symmetry*. <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/boundary-conditions/symmetry/>
- Syuhada, A., Sary, R., & Isnain, F. (2018). Kaji Sistem pengering Kakao dengan Menggunakan Energi Hybrid (Energi Matahari dan Bahan Bakar Gas). *Jurnal Teknik Mesin Unsyiah*, 6(1).
- Welty, J., Wicks, C. E., Rorrer, G. L., & Wilson, R. E. (2007). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (Fifth). John Wiley & Sons, Inc.
- White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Winterton, R. H. S. (1998). Where did the Dittus and Boelter equation come from? *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(4–5), 809–810. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00177-4)
- Xia, B., & Sun, D.-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. Dalam *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 34). [www.elsevier.com/locate/compag](http://www.elsevier.com/locate/compag)