

Ramdanu Gulfiannur_333121046_Fulltext. pdf

anonymous marking enabled

Submission date: 03-Aug-2025 12:01PM (UTC-0500)

Submission ID: 2723174417

File name: Ramdanu_Gulfiannur_333121046_Fulltext.pdf (2.03M)

Word count: 13091

Character count: 80211

**ANALISIS SIMULASI CFD PADA KINERJA TERMAL DAN
ALIRAN UDARA ALAT PENDINGIN RUMPUT LAUT TIPE
*SOLAR DRYER***

Skripsi



Disusun Oleh:

Ramdanu Gulfiannur
3331210046

2
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2025

**ANALISIS *SIMULASI* CFD PADA KINERJA TERMAL DAN
ALIRAN UDARA ALAT PENGERING RUMPUT LAUT TIPE
*SOLAR DRYER***

2
Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S1 pada
Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

**Ramdanu Gulfiannur
3331210046**

***JURUSAN TEKNIK MESIN*
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2025**

TUGAS AKHIR

ANALISIS SIMULASI CFD PADA KINERJA TERMAL DAN ALIRAN UDARA ALAT PENGERING RUMPUT LAUT TIPE *SOLAR DRYER*

Dipersiapkan dan disusun oleh:

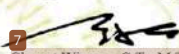
RAMDANU GULFIANNUR
3331210046

telah diperiksa oleh Dosen Dewan Penguji
pada tanggal, 10 Juli 2025

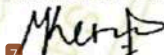
Pembimbing


Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T.
NIP. 196706022001122001

Anggota Dewan Penguji


Slamet Wiyono, S.T., M.T.
NIP. 197312182005011001


Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T.
NIP. 198902262015041002

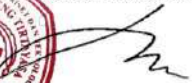

Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T.
NIP. 196706022001122001

48

Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk melanjutkan Tugas Akhir

Tanggal, 23 Juli 2025
Kema Jurusan Teknik Mesin




Ir. Dimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP. 198305102012121006

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi

ANALISIS SIMULASI CFD PADA KINERJA TERMAL DAN ALIRAN UDARA ALAT PENGERING RUMPUT LAUT TIPE *SOLAR DRYER*

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Ramdanu Gulfiannur

3331210046

40

Telah disetujui oleh dosen pembimbing skripsi

Pada tanggal 09 Juli 2025

Dosen Pembimbing,



7

Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T

NIP. 196706022001122001

2

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan

Untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal 10 Juli 2025

Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng

NIP. 198305102012121006

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Ramdanu Gulfiannur

NPM : 3331210046

Judul : Analisis Simulasi CFD Pada Kinerja Termal dan Aliran Udara Alat
Pengering Rumput Laut Tipe *Solar Dryer*

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Serang, 07 Juli 2025

A handwritten signature in black ink is written over a colorful, rectangular stamp. The stamp contains the text "METRIK TEMPAT" and "CEAMX371432127".

Ramdanu Gulfiannur

NPM. 3331210046

ABSTRAK

ANALISIS SIMULASI CFD PADA KINERJA TERMAL DAN ALIRAN UDARA ALAT PENGERING RUMPUT LAUT TIPE *SOLAR DRYER*

Disusun Oleh:

RAMDANU GULFIANNUR

3331210046

Pengeringan merupakan salah satu metode penting dalam pengolahan hasil kelautan seperti rumput laut. Namun, pengeringan secara konvensional masih memiliki banyak keterbatasan, seperti ketergantungan pada cuaca dan distribusi panas yang tidak merata. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi kinerja alat pengering rumput laut tipe *solar dryer* tidak langsung dengan memvariasikan kecepatan udara (0,3 m/s, 0,5 m/s, 2 m/s, dan 5 m/s) menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melalui perangkat lunak Solidworks *Flow Simulation*. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi suhu permukaan, lintasan aliran udara, dan efisiensi termal sistem pengering. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara menyebabkan distribusi suhu menjadi lebih merata, terutama pada kecepatan 5 m/s dengan suhu maksimum mencapai 46,65°C. Lintasan aliran udara pada kecepatan tinggi juga menunjukkan pola aliran yang menyeluruh dan menjangkau seluruh rak, termasuk bagian bawah, yang sebelumnya tidak teraliri dengan baik pada kecepatan rendah. Efisiensi termal meningkat seiring bertambahnya kecepatan udara, dari 0,021% pada 0,3 m/s menjadi 0,044% pada 5 m/s, namun nilai ini masih tergolong rendah jika dibandingkan standar literatur.

Kata Kunci: *Solar Dryer*, Rumput Laut, Simulasi CFD, Efisiensi Termal

ABSTRACT

ANALISIS SIMULASI CFD PADA KINERJA TERMAL DAN ALIRAN UDARA ALAT PENGERING RUMPUT LAUT TIPE *SOLAR DRYER*

Written By:

RAMDANU GULFIANNUR

3331210046

Drying is one of the important methods in processing marine products such as seaweed. However, conventional drying still has many limitations, such as dependence on weather and uneven heat distribution. This study aims to simulate the performance of an indirect solar dryer for seaweed by varying the air velocity (0.3 m/s, 0.5 m/s, 2 m/s, and 5 m/s) using Computational Fluid Dynamics (CFD) through Solidworks Flow Simulation software. The parameters analyzed include surface temperature distribution, airflow path, and thermal efficiency of the drying system. The simulation results show that increasing air velocity leads to more uniform temperature distribution, particularly at 5 m/s, with a maximum temperature of 46.65°C. The airflow path at high speeds also showed a comprehensive flow pattern that reached all racks, including the bottom, which was previously not well ventilated at low speeds. Thermal efficiency increased with increasing air speed, from 0.021% at 0.3 m/s to 0.044% at 5 m/s, but this value is still considered low compared to literature standards.

Keywords: Solar Dryer, Seaweed, CFD Simulation, Thermal Efficiency

KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur yang senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta 'ala yang telah memberikan segala nikmat dan karunia-Nya kepada semua orang sehingga skripsi ini dapat diselesaikan penulis sesuai dengan rencana dan waktu yang ditargetkan. Penulis sangat berterima kasih kepada orang-orang terdekat penulis sehingga dapat menyusun skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Penulis sampaikan rasa terima kasih antara lain kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang selalu mendukung dan mendoakan setiap waktu.
2. Bapak Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng, sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin.
2. Bapak Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T., sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
4. Ibu Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T., sebagai dosen pembimbing tugas akhir.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Eka Sari, M.T., IPM., Asean Eng., sebagai pembimbing dalam kegiatan penelitian tugas akhir.
6. Rekan-rekan satu tim Ibnu Sina dan Mochamad Marwan Hamid yang selalu memberikan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.
7. Teman-teman mahasiswa Teknik Mesin Untirta angkatan 2021 yang telah menemani perjalanan perkuliahan penulis dari awal hingga saat ini.
8. Siti Holifahtunisa, sebagai inspirator dan motivator yang selalu menemani penulis setiap saat dalam menyusun skripsi ini.

Penulis menyusun skripsi ini dengan sungguh-sungguh agar hasilnya maksimal. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna karena masih banyak kurangnya. Sekian dan terima kasih.

Serang, 12 April 2025

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. <i>State of The Art</i>	5
2.2. <i>Solar Dryer</i>	8
2.3. Prinsip Kerja <i>Solar Dryer</i>	9
2.4. Jenis-Jenis <i>Solar Dryer</i>	10
2.5. Komponen-Komponen <i>Solar Dryer</i>	11
2.6. <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	12
2.6.1. Prosedur Simulasi CFD	12
2.7. Pengeringan	13
2.8. Emisivitas	14
2.9. Perpindahan Panas	15
2.9.1. Konduksi	15
2.9.2. Konveksi	16
2.9.3. Radiasi	17
2.10. Pengeringan Rumput Laut	18

2.10.1. Selada Laut (<i>Ulva Lactuca</i>)	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Diagram Alir Penelitian	21
3.2. Metode Penelitian Berdasarkan Diagram Alir	22
3.3. Alat yang Digunakan	26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1. Desain <i>Solar Dryer</i>	27
4.1.1. Sketsa	27
4.1.2. Model 3D	28
4.1.3. Dimensi	28
4.1.4. Massa Jenis Rumput Laut	32
4.1.5. Perhitungan Kapasitas	33
4.2. Kondisi Batas dan Parameter Simulasi	34
4.2.1. <i>Mesh</i>	35
4.2.2. Kondisi Awal	35
4.2.3. Kondisi Batas	36
4.2.4. Material	36
4.2.5. <i>Goals</i>	37
4.2.6. Parameter Pengolahan Simulasi	38
4.3. Hasil Simulasi	40
4.3.1. Suhu Permukaan	43
4.3.2. Lintasan Aliran	45
4.4. Analisis Hasil	48
4.4.1. Hasil Perhitungan	48
4.4.2. Pembahasan	52
BAB V PENUTUP	
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Solar Dryer</i>	8
Gambar 2.2 Prinsip Kerja <i>Solar Dryer</i>	10
Gambar 2.3 Komponen-Komponen <i>Solar Dryer</i>	12
Gambar 2.4 CFD Pada Solidworks <i>Flow Simulation</i>	12
Gambar 2.5 Perpindahan Panas Konduksi	15
Gambar 2.6 Perpindahan Panas Konveksi	16
Gambar 2.7 Perpindahan Panas Radiasi	18
Gambar 2.8 <i>Ulva lactuca</i>	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 4.1 Sketsa Model <i>Solar Dryer</i>	27
Gambar 4.2 <i>Indirect Solar Dryer</i>	28
Gambar 4.3 Rangka Kaki	29
Gambar 4.4 <i>Solar Collector</i>	29
Gambar 4.5 <i>Drying Chamber</i>	30
Gambar 4.6 Kaca 4 mm	31
Gambar 4.7 Rak Pengering	31
Gambar 4.8 Grafik Berat Rumput Laut	33
Gambar 4.9 Kontur Suhu Rak Pengering dan Kaca 5 m/s	45
Gambar 4.10 Kontur Suhu Pelat Absorber 5 m/s	45
Gambar 4.11 Distribusi Kecepatan Udara 5 m/s	47
Gambar 4.12 Distribusi Suhu Udara 5 m/s	47

	Halaman
Tabel 2.1 <i>State of the Art</i>	5
Tabel 4.1 Data Berat <i>Ulva lactuca</i>	32
Tabel 4.2 Kondisi Awal Dryer	35
Tabel 4.3 Parameter Kondisi Batas	36
Tabel 4.4 Goals Kecepatan Udara 0,3 m/s	40
Tabel 4.5 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 0,3 m/s	41
Tabel 4.6 Goals Kecepatan Udara 0,5 m/s	41
Tabel 4.7 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 0,5 m/s	41
Tabel 4.8 Goals Kecepatan Udara 2 m/s	42
Tabel 4.9 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 2 m/s	42
Tabel 4.10 Goals Kecepatan Udara 5 m/s	42
Tabel 4.11 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 5 m/s	43
Tabel 4.12 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 0,3 m/s	52
Tabel 4.13 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 0,5 m/s	53
Tabel 4.14 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 2 m/s	53
Tabel 4.15 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 5 m/s	54

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki garis pantai terpanjang kedua di dunia, yang menjadikannya kaya akan sumber daya kelautan (Kementerian Kelautan dan Perikanan RI, 2021). Salah satu hasil laut yang memiliki nilai ekonomi tinggi adalah rumput laut. Komoditas ini banyak dibudidayakan di berbagai wilayah pesisir Indonesia karena memiliki permintaan pasar yang terus meningkat, baik di dalam negeri maupun untuk ekspor. Rumput laut digunakan dalam berbagai industri, seperti pangan, farmasi, kosmetik, dan industri pengolahan lainnya karena kandungan senyawa bioaktif seperti agar, karagenan, dan alginat (FAO, 2020).

Namun, dalam rantai pasok rumput laut, proses pascapanen khususnya pengeringan menjadi tahap yang sangat krusial. Pengeringan bertujuan untuk menurunkan kadar air sehingga rumput laut tidak mudah rusak dan dapat disimpan lebih lama. Saat ini, mayoritas petani masih mengandalkan metode penjemuran langsung di bawah sinar matahari. Meski sederhana dan murah, cara ini sangat tergantung pada kondisi cuaca, rawan kontaminasi oleh debu atau hewan, serta menghasilkan mutu produk yang tidak seragam. Waktu pengeringan yang lama juga menyebabkan kapasitas produksi menjadi terbatas.

Untuk mengatasi kendala tersebut, teknologi *solar dryer* atau alat pengering tenaga surya menjadi alternatif yang menjanjikan. *Solar dryer* mampu meningkatkan efisiensi proses pengeringan, menjaga kebersihan produk, serta mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca. Prinsip kerja alat ini adalah memanfaatkan energi panas dari matahari untuk memanaskan udara yang kemudian dialirkan ke dalam ruang pengering, sehingga mempercepat proses penguapan air dari rumput laut. Namun, agar alat ini dapat bekerja secara optimal, distribusi panas dan aliran udara di dalam ruang pengering harus dirancang dengan cermat.

Dalam proses desain dan pengembangan alat pengering, analisis eksperimental sering kali memerlukan waktu dan biaya yang besar. Untuk itu, pendekatan berbasis simulasi menjadi sangat bermanfaat. Salah satu metode simulasi yang banyak digunakan dalam bidang teknik fluida dan perpindahan panas adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD memungkinkan analisis perilaku aliran udara dan distribusi temperatur secara detail di dalam ruang pengering tanpa harus melakukan pengujian fisik berulang kali. Dengan menggunakan CFD, berbagai parameter desain dapat dievaluasi dan dimodifikasi secara efisien untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Pemanfaatan CFD dalam perancangan *solar dryer* sangat relevan untuk memastikan efisiensi proses pengeringan dan kualitas produk akhir. Melalui simulasi, dapat dipelajari bagaimana variasi suhu, kecepatan aliran udara, dan desain ruang pengering memengaruhi kinerja alat secara keseluruhan. Hal ini penting untuk diterapkan khususnya dalam pengeringan rumput laut yang memiliki karakteristik tersendiri, seperti kandungan air yang tinggi dan struktur yang mudah rusak jika terlalu panas.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi kinerja alat pengering rumput laut menggunakan *solar dryer* dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Studi ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai distribusi aliran udara dan temperatur di dalam ruang pengering serta mengevaluasi performa termal alat. Hasil dari simulasi ini dapat dijadikan sebagai dasar untuk pengembangan desain alat pengering rumput laut yang lebih efisien, higienis, dan ramah lingkungan.

64

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dapat diidentifikasi berdasarkan latar belakang dilakukannya penelitian, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik distribusi aliran udara dan temperatur di dalam ruang pengering rumput laut pada *solar dryer* berdasarkan simulasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD)?
2. Bagaimana efektivitas kinerja termal dari alat pengering rumput laut dengan menggunakan energi surya berdasarkan hasil simulasi CFD?

3. Bagaimana pengaruh variasi parameter terhadap efisiensi proses pengeringan berdasarkan hasil simulasi?

36

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berkaitan erat dengan rumusan masalah yang diangkat. Berikut di bawah ini merupakan tujuan dilakukannya penelitian:

1. Menganalisis distribusi aliran udara dan temperatur di dalam ruang pengering rumput laut pada sistem *solar dryer* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).
2. Memahami kinerja termal dari alat pengering rumput laut bertenaga surya berdasarkan hasil simulasi CFD, termasuk efisiensi perpindahan panas dan kecepatan pengeringan.
3. Mengevaluasi pengaruh variasi parameter terhadap performa alat dalam proses pengeringan.

3

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, terdapat batasan masalah agar penelitian yang dilakukan tidak keluar topik pembahasan dan tujuan yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut ini adalah batasan masalah yang dimaksud dalam penelitian ini, yaitu:

1. Jenis bahan yang dikeringkan merupakan selada laut yang berspesies *Ulva lactuca*.
2. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Solidworks 2024 dengan asumsi kondisi tunak (*steady state*).
3. Sumber energi panas yang digunakan hanya berasal dari energi matahari, yang dikonversi menjadi panas melalui kolektor termal pasif.
4. Kondisi lingkungan eksternal (cuaca, radiasi matahari, suhu udara) disederhanakan dengan asumsi konstan berdasarkan kondisi geografis di Kota Cilegon.

Dalam melakukan penelitian ini, terdapat beberapa manfaat positif yang dapat membantu beberapa pihak seperti instansi, masyarakat, maupun mahasiswa. Berikut di bawah ini merupakan manfaat dari dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut:

1. Dengan meningkatkan efisiensi proses pengeringan melalui desain yang optimal, penelitian yang dilakukan diharapkan dapat menurunkan biaya operasional, meningkatkan mutu hasil pengeringan, serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.
2. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil pascapanen bagi para petani rumput laut, khususnya di daerah pesisir.
3. Penelitian ini dapat menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin, khususnya pada penerapan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk menganalisis sistem perpindahan panas dan fluida pada alat pengering. Hasil penelitian ini juga dapat memperkaya literatur dalam hal pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya, untuk proses pengeringan produk pertanian dan kelautan.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *State of The Art*

Pengeringan merupakan tahap penting dalam pengolahan rumput laut, namun metode tradisional seperti penjemuran langsung masih memiliki banyak keterbatasan, seperti ketergantungan cuaca dan hasil yang tidak merata. Inovasi seperti *solar dryer* baik tipe langsung, tidak langsung, maupun *hybrid* telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas pengeringan, namun tantangan distribusi panas yang merata masih menjadi kendala. Pendekatan berbasis simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memungkinkan analisis distribusi suhu dan aliran udara secara detail dalam sistem pengering (Fudholi et al., 2011). Meskipun CFD telah banyak digunakan pada produk lain, penerapannya pada rumput laut masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mensimulasikan kinerja alat pengering rumput laut berbasis *solar dryer* dengan metode CFD untuk menganalisis distribusi suhu dan aliran udara, guna mendukung perbaikan desain sistem yang lebih efisien dan sesuai kebutuhan industri. Berikut merupakan tabel dari beberapa jurnal terdahulu yang melakukan penelitian terkait permasalahan tersebut.

Tabel 2.1 *State of the Art*

NO	Deskripsi Jurnal (Judul, Peneliti, Tahun)	Objek Penelitian	Hasil dan Pembahasan
1.	⁴² <i>ENERGY AND EXERGY ANALYSES OF SOLAR DRYING SYSTEM OF RED SEAWEED</i> (Fudholi et al., 2014)	Penelitian ini mengkaji sistem pengeringan tenaga surya tidak langsung untuk rumput laut merah. Fokusnya pada analisis energi dan eksergi dalam proses	Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengering tenaga surya mampu menurunkan kadar air rumput laut merah dari 90% menjadi 10% dalam waktu 15 jam

		pengeringan untuk meningkatkan efisiensi termal dan mengetahui potensi perbaikannya. Penelitian juga menguji model matematis pengeringan dan membandingkan akurasi model (Page, Newton, Henderson & Pabis) menggunakan data eksperimental.	dengan efisiensi kolektor 35%, efisiensi sistem pengering 27%, dan efisiensi pengambilan uap air sebesar 95%, serta konsumsi energi spesifik sebesar 2,62 kWh/kg; analisis eksergi menunjukkan efisiensi rata-rata 30% dan potensi perbaikan rata-rata 247 W, sedangkan model matematis terbaik untuk memodelkan pengeringan adalah model Page karena memiliki nilai R^2 tertinggi (0,9676) dan <i>error</i> terendah dibandingkan model Newton dan Henderson-Pabis.
2.	²³ NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF TOPOLOGY ON THE AIRFLOW CHARACTERISTICS INSIDE AN INDIRECT SOLAR DRYER (Thomas et al., 2018)	Penelitian ini melakukan simulasi numerik menggunakan metode CFD untuk mempelajari pengaruh bentuk topologi (geometri) pada karakteristik aliran udara di dalam pengering surya tidak	Simulasi numerik menggunakan CFD menunjukkan bahwa sudut kemiringan kolektor 30°, tinggi ruang pengering 1,4 m, dan cerobong 1,5 m memberikan distribusi suhu dan kecepatan udara paling merata, dengan rentang suhu

		langsung. Variasi mencakup sudut kolektor (0°, 30°, 40°, 60°), tinggi ruang pengering (1, 1.2, 1.4 m), dan tinggi cerobong (0.3, 0.8, 1.5 m).	pengering 56–64°C dan kecepatan udara 0,5–0,9 m/s, sehingga konfigurasi topologi tersebut dianggap optimal untuk efisiensi termal pengering surya tidak langsung dalam menjaga keseragaman pengeringan produk.
3.	SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) RUMAH PENDING KOPIL MENGGUNAKAN PLASTIK ULTRAVIOLET (UV) SOLAR DRYER (Ndeo et al., 2021)	Studi ini mensimulasikan distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara dalam rumah pengering kopi berbahan plastik UV menggunakan perangkat lunak CFD (Gambit 2.4.6 & Ansys Fluent 17.0). Tujuannya adalah mengetahui pola aliran dan distribusi suhu untuk memastikan keseragaman mutu produk.	Simulasi CFD pada rumah pengering kopi berbahan plastik UV menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran 1,36 m/s hasil simulasi mendekati data eksperimen, dengan distribusi suhu udara yang cenderung seragam seiring waktu; suhu meningkat di bagian inlet pada siang hari dan di outlet pada sore hari, sementara kecepatan aliran dan pemilihan material plastik UV (transmisi cahaya 85%) berkontribusi pada kinerja pengeringan yang efektif dan efisien untuk kapasitas ±50 kg biji kopi.

2.2. Solar Dryer

Solar dryer atau pengering surya adalah alat yang dirancang untuk mengeringkan bahan-bahan seperti buah, sayuran, dan produk pertanian lainnya dengan memanfaatkan energi matahari. Proses pengeringan ini dilakukan dengan cara mengalirkan udara panas yang dihasilkan oleh sinar matahari melalui bahan yang akan dikeringkan, sehingga kelembapan dalam bahan tersebut dapat berkurang secara efektif. *Solar dryer* merupakan alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional yang sering menggunakan bahan bakar fosil atau listrik, sehingga dapat mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan (Lee et al., 2019).

Terdapat berbagai jenis *solar dryer* yang tersedia, mulai dari desain yang sederhana hingga yang lebih kompleks. *Solar dryer* sederhana biasanya terdiri dari sebuah kotak dengan penutup transparan yang memungkinkan sinar matahari masuk, sementara *solar dryer* yang lebih canggih dilengkapi dengan sistem ventilasi dan pengatur suhu untuk meningkatkan efisiensi pengeringan. Beberapa desain juga memanfaatkan efek rumah kaca, di mana sinar matahari terperangkap di dalam ruang pengering, meningkatkan suhu dan mempercepat proses pengeringan (Lee et al., 2019).



Gambar 2.1 *Solar Dryer*
(Sumber: sciencedirect.com)

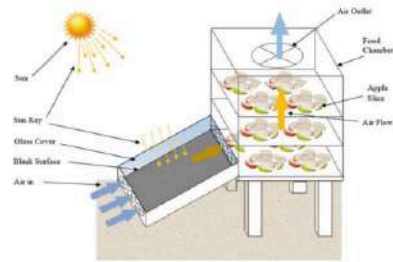
Keuntungan utama dari penggunaan *solar dryer* adalah kemampuannya untuk meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan. Dengan mengurangi kadar air dalam produk, *solar dryer* membantu mencegah pertumbuhan jamur dan bakteri, yang sering menjadi masalah dalam pengeringan tradisional. Selain itu, produk yang dikeringkan dengan *solar dryer* cenderung memiliki warna, aroma, dan rasa yang lebih baik, sehingga meningkatkan nilai jualnya (Lingayat et al., 2017).

Solar dryer berkontribusi pada pengurangan ketergantungan pada sumber energi *non-renewable* dan membantu mengurangi emisi karbon. Dengan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah, yaitu sinar matahari, *solar dryer* menjadi solusi yang menarik bagi petani dan produsen makanan di daerah yang memiliki sinar matahari yang cukup (Lingayat et al., 2017).

2.3. Prinsip Kerja *Solar Dryer*

Prinsip kerja *solar dryer* berfokus pada pemanfaatan energi matahari untuk mengeringkan bahan-bahan pertanian. Alat ini biasanya terdiri dari ruang pengering yang dilengkapi dengan penutup transparan yang memungkinkan sinar matahari masuk. Ketika sinar matahari mengenai permukaan dalam ruang pengering, energi panas terakumulasi, meningkatkan suhu di dalam ruang tersebut. Udara panas kemudian mengalir melalui bahan yang akan dikeringkan, menguapkan kelembapan yang ada di dalamnya (Amer et al., 2010).

Proses pengeringan dalam *solar dryer* juga melibatkan sirkulasi udara. Beberapa desain *solar dryer* dilengkapi dengan ventilasi yang memungkinkan udara segar masuk dan udara lembap keluar. Dengan cara ini, kelembapan yang dihasilkan selama proses pengeringan dapat dihilangkan secara efektif, sehingga mempercepat proses pengeringan. Selain itu, beberapa *solar dryer* menggunakan sistem pengatur suhu untuk menjaga suhu optimal selama proses pengeringan, yang dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk yang dihasilkan (Amer et al., 2010).



Gambar 2.2 Prinsip Kerja *Solar Dryer*
(Sumber: greenhousesolardryer.com)

2.4. Jenis-Jenis *Solar Dryer*

Pemanfaatan *solar dryer* dalam kegiatan industri maupun kegiatan sehari-hari, banyak jenis yang digunakan berdasarkan kebutuhan. Berikut ini merupakan jenis-jenis *solar dryer* yang dapat digunakan dalam sebuah kegiatan, yaitu:

1. *Direct Solar Dryer* (Pengering Surya Langsung)

Pengering tipe langsung bekerja dengan memanfaatkan sinar matahari yang langsung jatuh pada produk melalui penutup transparan, di mana produk menyerap panas dan mengalami proses pengeringan secara langsung (El-Sebaai & Shalaby, 2012). Jenis ini memanfaatkan radiasi matahari langsung yang diserap oleh bahan yang dikeringkan. Bahan diletakkan dalam ruang transparan, dan panas dari matahari secara langsung mengeringkan bahan.

2. *Indirect Solar Dryer* (Pengering Surya Tidak Langsung)

Pengering surya tidak langsung menggunakan kolektor sebagai penangkap panas, kemudian udara panas tersebut diarahkan ke ruang pengering untuk mengeringkan bahan secara tidak langsung (Sopian et al., 2005).

3. *Mixed Mode Solar Dryer* (Pengering Mode Campuran)

Tipe *mixed-mode* menggabungkan pemanasan langsung dan tidak langsung untuk meningkatkan efisiensi dan mempercepat proses pengeringan (Ekechukwu & Norton, 1999).

4. Hybrid Solar Dryer

Pengering surya hibrida mengombinasikan energi matahari dengan sumber panas tambahan untuk menjaga kestabilan suhu pengeringan meskipun intensitas radiasi matahari berubah-ubah (Jauch et al., 2007). Kombinasi dari *solar dryer* dengan sumber panas tambahan seperti listrik, biomassa, atau gas, sehingga tetap bisa bekerja meski sinar matahari kurang optimal.

2.5. Komponen-Komponen Solar Dryer

Solar dryer atau pengering surya yang digunakan terdapat beberapa komponen di dalamnya yang memiliki perannya masing-masing. Berikut ini merupakan komponen-komponen utama yang terdapat pada *solar dryer*, yaitu:

1. Kolektor Surya (*Solar Collector*)

Berfungsi sebagai alat penangkap dan pengubah radiasi matahari menjadi panas. Biasanya berupa plat datar berwarna hitam dengan permukaan penyerap (*absorber*) dan penutup transparan seperti kaca atau plastik bening.

2. Ruang Pengering (*Drying Chamber*)

Tempat bahan diletakkan untuk dikeringkan. Ruangan ini didesain agar aliran udara panas dapat merata dan efisien dalam membawa uap air dari bahan.

3. Sirkulasi Udara (*Ventilasi / Ducting System*)

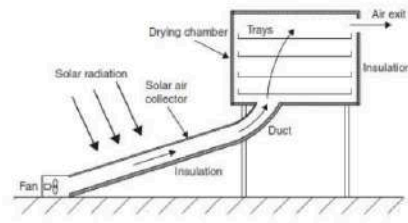
Tempat bahan diletakkan untuk dikeringkan. Ruangan ini didesain agar aliran udara panas dapat merata dan efisien dalam membawa uap air dari bahan.

4. Penutup Transparan (*Covering / Glazing*)

Berfungsi menjaga suhu dalam kolektor tetap tinggi dengan meminimalisir kehilangan panas dan memungkinkan cahaya masuk.

5. Rak atau *Tray* Pengering

Digunakan untuk meletakkan bahan yang akan dikeringkan. Umumnya terbuat dari bahan tahan panas dan bersifat *food grade*.



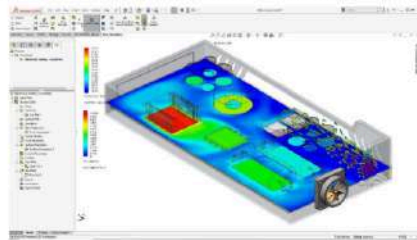
Gambar 2.3 Komponen-Komponen *Solar Dryer*

(Sumber: pttensor.com)

15

2.6. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah cabang ilmu dari mekanika fluida yang menggunakan pendekatan numerik dan pemodelan berbasis komputer untuk menyelesaikan serta menganalisis permasalahan yang berkaitan dengan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait. CFD bertujuan untuk memberikan solusi kuantitatif dari perilaku fluida berdasarkan hukum-hukum dasar fisika yang dijabarkan dalam bentuk persamaan matematika (Versteeg & Malalasekera, 2007).



Gambar 2.4 CFD Pada Solidworks *Flow Simulation*

(Sumber: goengineer.com)

2.6.1. *Prosedur Simulasi CFD*

Simulasi CFD umumnya terdiri atas tiga tahap utama:

1. *Pre-processing*

Pembuatan model geometri, pengaturan *mesh* atau *grid*, pemberian batas (*boundary conditions*), serta penentuan properti fluida.

2. Solving

Penyelesaian numerik menggunakan metode diskretisasi seperti *Finite Volume Method (FVM)* untuk memperoleh solusi dari persamaan aliran.

3. Post-processing

Visualisasi dan analisis hasil simulasi dalam bentuk grafik, kontur suhu, aliran kecepatan, serta distribusi tekanan.

Algoritma yang umum digunakan antara lain metode SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) dan PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) untuk masalah aliran inkompresibel (Patankar, 1980).

2.7. Pengeringan

Pengeringan adalah proses penghilangan kelembapan dari bahan, yang bertujuan untuk mengurangi kadar air hingga tingkat yang diinginkan. Proses ini sangat penting dalam berbagai industri, termasuk pertanian, makanan, dan farmasi, karena kelembapan yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan, pertumbuhan mikroorganisme, dan penurunan kualitas produk. Dalam konteks pertanian, pengeringan sering dilakukan untuk meningkatkan umur simpan hasil panen, seperti biji-bijian, buah-buahan, dan sayuran. Dengan mengurangi kadar air, produk menjadi lebih ringan, lebih mudah disimpan, dan lebih tahan terhadap kerusakan (Mujumdar, 2000).

Ada berbagai metode pengeringan yang dapat digunakan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan. Metode pengeringan yang paling umum adalah pengeringan matahari, di mana bahan diletakkan di bawah sinar matahari langsung untuk menguapkan kelembapan. Meskipun metode ini sederhana dan biaya yang rendah, akan tetapi metode ini memiliki kelemahan yaitu ketergantungan pada cuaca dan risiko kontaminasi oleh debu atau serangga. Di sisi lain, pengeringan mekanis menggunakan alat pengering yang memanfaatkan energi listrik atau bahan bakar dapat memberikan kontrol yang lebih baik terhadap suhu dan kelembapan (Haman et al., 2017).

Pengeringan memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kualitas dan nilai jual produk. Dalam industri makanan, misalnya, pengeringan yang tepat dapat mempertahankan kandungan nutrisi, warna, dan rasa, yang semuanya berkontribusi pada daya tarik konsumen. Selain itu, pengeringan juga berkontribusi pada efisiensi logistik, karena produk yang lebih ringan dan lebih kering lebih mudah untuk diangkut dan disimpan (Fudholi, Othman, M. Y., et al., 2011).

2.8. Emisivitas

Emisivitas adalah ukuran kemampuan suatu permukaan dalam memancarkan energi radiasi. Nilai emisivitas berkisar antara 0 (tidak memancarkan sama sekali) hingga 1 (*blackbody* sempurna). Dalam sebuah sistem, emisivitas pelat *absorber* sangat menentukan kinerja penyerapan dan pelepasan panas. Semakin tinggi nilai emisivitas, semakin banyak panas yang dilepaskan oleh permukaan ke lingkungan, dan ini dapat menjadi kerugian jika tidak dikendalikan secara tepat (Duffie & Beckman, 2013).

Pada pelat kolektor surya, diperlukan kombinasi absorptivitas tinggi untuk menyerap energi matahari dan emisivitas rendah untuk meminimalkan kehilangan panas lewat radiasi inframerah. Oleh karena itu, permukaan *absorber* biasanya dilapisi dengan cat hitam *doff* atau material selektif seperti *chrome black*, yang memiliki sifat spektral selektif, yaitu menyerap cahaya tampak tetapi memantulkan radiasi inframerah. Menurut studi Duarte et al. (2018), peningkatan emisivitas dari 0,05 ke 0,95 dapat menyebabkan penurunan efisiensi termal hingga 20% dalam sistem kolektor datar.

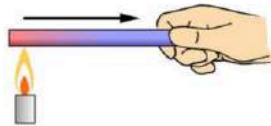
Emisivitas juga dipengaruhi oleh suhu dan kondisi permukaan, seperti kekasaran, oksidasi, dan pelapisan. Material logam polos seperti aluminium memiliki emisivitas rendah (sekitar 0,04), tetapi bila dilapisi cat hitam, nilai ini dapat meningkat hingga 0,95. Untuk kegunaan seperti eksperimen dan penelitian, digunakan pelat *absorber* aluminium yang dilapisi hitam dengan nilai emisivitas 0,95. Meskipun tinggi, ini mewakili kondisi lapangan yang umum dan memberikan nilai serap yang baik terhadap radiasi matahari (Kalogirou, 2004).

2.9. Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses di mana energi termal berpindah dari satu objek atau sistem ke objek atau sistem lain akibat perbedaan suhu. Terdapat tiga mekanisme utama perpindahan panas: konduksi, konveksi, dan radiasi. Berikut ini penjelasan lengkap dari ketiga jenis perpindahan panas:

2.9.1. Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah proses transfer energi termal melalui bahan padat yang terjadi akibat perbedaan suhu antara bagian-bagian dari bahan tersebut. Dalam konduksi, panas berpindah dari area dengan suhu tinggi ke area dengan suhu rendah melalui interaksi langsung antara partikel-partikel dalam bahan. Proses ini tidak memerlukan pergerakan massa fluida, melainkan bergantung pada vibrasi dan gerakan partikel di dalam bahan. Koefisien konduktivitas termal adalah parameter penting yang menentukan seberapa cepat panas dapat berpindah melalui suatu material. Material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti logam, akan menghantarkan panas lebih cepat dibandingkan dengan material dengan konduktivitas rendah, seperti kayu atau plastik (Kaviany & Kanury, 2002).



Gambar 2.5 Perpindahan Panas Konduksi

(Sumber: fisika.co.id)

Hukum Fourier adalah prinsip dasar yang menggambarkan perpindahan panas konduksi. Hukum ini menyatakan bahwa laju perpindahan panas melalui suatu material sebanding dengan gradien suhu di dalam material tersebut. Secara matematis, hukum ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (2.1)$$

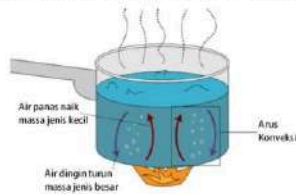
Keterangan:

q = Laju perpindahan panas

k = Koefisien konduktivitas termal
 A = Luasan bidang perpindahan panas
 ΔT = Perbedaan suhu
 Δx = Jarak bidang perbedaan panas

2.9.2. Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah proses transfer energi termal yang terjadi dalam fluida (cair atau gas) akibat pergerakan massa fluida itu sendiri. Proses ini terjadi ketika fluida yang lebih panas, yang memiliki densitas lebih rendah, bergerak naik, sementara fluida yang lebih dingin, yang lebih padat, turun. Konveksi dapat dibedakan menjadi dua jenis: konveksi alami dan konveksi paksa. Konveksi alami terjadi secara spontan akibat perbedaan suhu dan densitas, seperti aliran udara panas yang naik di dalam ruangan. Sementara itu, konveksi paksa melibatkan penggunaan alat eksternal, seperti kipas atau pompa, untuk meningkatkan aliran fluida dan mempercepat proses perpindahan panas (Kaviany & Kanury, 2002).



Gambar 2.6 Perpindahan Panas Konveksi

(Sumber: fisika.co.id)

Salah satu prinsip dasar dalam konveksi adalah Hukum Newton tentang pendinginan, yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas antara permukaan dan fluida sebanding dengan perbedaan suhu antara keduanya. Secara matematis, hukum ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = hA \Delta T \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

Q = Laju perpindahan panas (Joule)

h = Koefisien konveksi termal (W/m^2K)

A = Luas penampang rambatan kalor (m^2)

ΔT = Perbedaan suhu dua permukaan ($^{\circ}C$ atau K)

Konveksi memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan sehari-hari dan industri. Contohnya, dalam sistem pemanas ruangan, konveksi membantu mendistribusikan udara hangat ke seluruh ruangan. Dalam proses pendinginan, seperti pada radiator mobil, konveksi membantu menghilangkan panas dari mesin. Selain itu, konveksi juga berperan penting dalam proses pengeringan, seperti pada *solar dryer*, di mana aliran udara panas membantu menguapkan kelembapan dari bahan yang dikeringkan. Memahami mekanisme konveksi sangat penting untuk merancang sistem yang efisien dalam berbagai aplikasi teknik dan industri.

2.9.3. Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah proses transfer energi termal yang terjadi melalui gelombang elektromagnetik, tanpa memerlukan medium perantara seperti udara atau bahan padat. Semua benda yang memiliki suhu di atas nol mutlak memancarkan radiasi termal, yang merupakan bentuk energi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Proses ini berbeda dari konduksi dan konveksi, yang memerlukan kontak fisik atau pergerakan fluida untuk mentransfer panas (Janna, 2018).

Hukum Stefan-Boltzmann adalah salah satu prinsip dasar yang mengatur perpindahan panas radiasi. Hukum ini menyatakan bahwa laju radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda sebanding dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya (dalam Kelvin). Secara matematis, hukum ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$I = \frac{P}{A} = e\sigma T^4 \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

I = Intensitas radiasi (W/m^2)

P = Daya radiasi (Watt atau J/s)

e = emisivitas benda

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

T = Suhu (K)

Perpindahan panas radiasi memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan sehari-hari dan teknologi. Contohnya, dalam desain sistem pemanas, seperti pemanas infra merah, radiasi digunakan untuk memanaskan objek atau ruangan secara langsung. Radiasi juga berperan penting dalam proses pemanasan atmosfer dan pengaturan suhu Bumi. Selain itu, pemahaman tentang radiasi termal sangat penting dalam rekayasa termal, seperti dalam desain insulasi bangunan dan sistem pendingin. Dengan memahami mekanisme perpindahan panas radiasi, kita dapat merancang sistem yang lebih efisien dan efektif dalam berbagai aplikasi teknik.



Gambar 2.7 Perpindahan Panas Radiasi

(Sumber: fisika.co.id)

2.10. Pengeringan Rumput Laut

Rumput laut merupakan kelompok tumbuhan laut yang termasuk dalam makro alga dan hidup menempel pada substrat di lingkungan perairan, terutama di daerah pesisir. Tumbuhan ini memiliki kemampuan fotosintesis seperti tumbuhan darat dan dibedakan menjadi tiga golongan besar berdasarkan pigmen dominan yang dikandungnya, yaitu *Chlorophyta* (rumput laut hijau), *Phaeophyta* (rumput laut coklat), dan *Rhodophyta* (rumput laut merah) (Anggadiredja et al., 2008). Di Indonesia, jenis rumput laut yang paling banyak dibudidayakan adalah dari kelompok *Rhodophyta*, terutama *Kappaphycus alvarezii* dan *Eucheuma cottonii*, karena mengandung karaginan yang tinggi dan bernilai ekonomis.

Rumput laut memiliki kandungan air yang tinggi, sekitar 80–90% dari berat basahanya, sehingga pengeringan merupakan proses penting dalam penanganan pascapanen. Kandungan utama rumput laut selain air adalah karbohidrat (terutama polisakarida seperti agar, alginat, dan karaginan), sedikit protein, lemak, serta mineral seperti kalsium, magnesium, dan yodium (Susanto, 2012). Oleh karena itu, pengolahan rumput laut menjadi bahan baku industri makanan, farmasi, dan kosmetik membutuhkan proses pengeringan yang efektif agar kualitas zat aktif tidak rusak dan produk dapat disimpan dalam jangka panjang.

Proses pengeringan tradisional yang umum dilakukan di Indonesia adalah penjemuran langsung di bawah sinar matahari. Namun metode ini memiliki kelemahan seperti ketergantungan pada cuaca, waktu pengeringan yang lama, dan risiko kontaminasi oleh debu serta hewan. Oleh karena itu, teknologi pengeringan seperti *solar dryer* menjadi alternatif yang sangat potensial untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi proses pengeringan rumput laut. Penggunaan teknologi ini dapat menjaga mutu fisik dan kimia rumput laut yang akan diolah lebih lanjut, sekaligus meningkatkan nilai jualnya di pasar ekspor (Trisyono et al., 2016).

2.10.1. Selada Laut (*Ulva Lactuca*)

Selada laut merupakan jenis rumput laut hijau yang termasuk dalam divisi *Chlorophyta*, dengan genus *Ulva*. Salah satu spesies paling umum dan bernilai ekonomi dari genus ini adalah *Ulva lactuca*, yang memiliki bentuk seperti lembaran tipis dan menyerupai daun selada, sehingga dikenal dengan nama umum "*sea lettuce*". Tumbuhan ini tumbuh di daerah intertidal dan subtidal dangkal dengan substrat batuan atau pasir dan sangat adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan perairan (Lobban & Harrison, 1994). Warna hijaunya berasal dari dominasi pigmen klorofil-a dan klorofil-b, menjadikannya salah satu makroalga yang efisien dalam proses fotosintesis.

Ulva lactuca memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, meliputi protein (hingga 25% berat kering), serat kasar, serta berbagai vitamin dan mineral seperti magnesium, kalsium, dan zat besi. Selain digunakan sebagai bahan pangan dan pakan ternak, *Ulva lactuca* juga banyak diteliti untuk potensi bioaktifnya seperti antioksidan, antibakteri, dan kemampuan menyerap logam berat (Yaich et al., 2011).

Di wilayah pesisir Cilegon, Banten, *Ulva lactuca* tumbuh melimpah terutama di area dengan substrat bebatuan dan muara sungai yang memiliki pasang surut signifikan. Studi oleh Wahyudin et al. (2020) menunjukkan bahwa perairan Cilegon menyediakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan *Ulva lactuca*, terutama karena kandungan nutrisi dari aktivitas antropogenik yang memicu eutrofikasi..



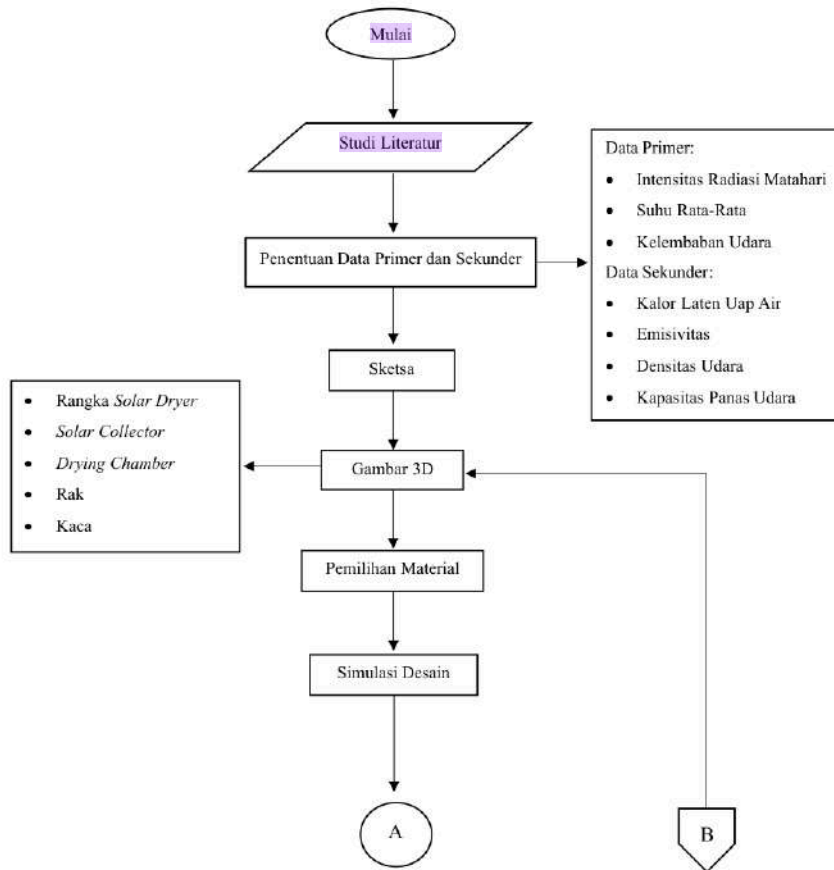
Gambar 2.8 *Ulva lactuca*

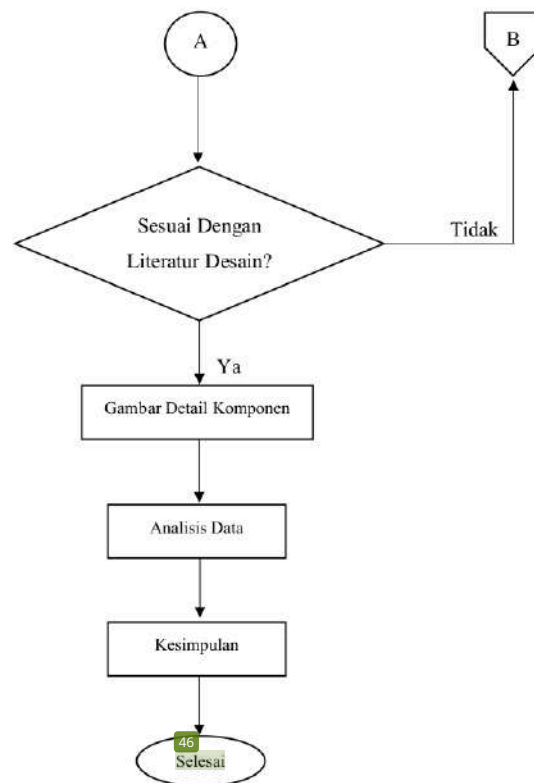
(Sumber: id.m.wiktionary.org)

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir penelitian mencakup tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Metode Penelitian Berdasarkan Diagram Alir

Penelitian ini dilakukan dengan studi eksperimental berdasarkan diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 di atas. Berikut ini penjelasan lengkap tentang alur proses penelitian sesuai dengan diagram alir penelitian, sebagai berikut (Versteeg & Malalasekera, 2007):

1. Studi Literatur

Sebelum melakukan sebuah penelitian, langkah yang tepat untuk dilakukan adalah memperdalam pengetahuan terkait studi yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman mendalam terkait konsep-konsep dasar dan kajian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian. Literatur yang dikaji meliputi teori dasar perpindahan panas (konduksi, konveksi, dan radiasi), karakteristik termal material, prinsip kerja *solar dryer*, karakteristik morfologi dan komposisi rumput laut (khususnya *Ulva Lactuca*), serta metode dan aplikasi simulasi CFD dalam pengeringan. Hasil studi literatur digunakan sebagai acuan untuk perancangan dan penentuan parameter dalam simulasi.

2. Menentukan Data Primer dan Sekunder

Data primer yang dikumpulkan berupa pengamatan langsung terhadap kondisi lingkungan di sekitar wilayah pesisir Cilegon, seperti suhu dan kecepatan udara, kelembaban dan intensitas radiasi matahari harian. Data ini penting untuk mengasumsikan kondisi batas (*boundary conditions*) saat simulasi berlangsung. Sedangkan data sekunder diperoleh dari literatur dan sumber resmi seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atau jurnal yang terverifikasi. Data ini mencakup parameter fisik seperti densitas udara, kalor laten, kapasitas panas udara, serta emisivitas pelat aluminium hitam. Ketersediaan dan akurasi data ini sangat penting untuk menjamin realisme dan validitas hasil simulasi.

3. Menggambar Sketsa

Tahapan ini dilakukan dengan membuat sketsa konseptual dua dimensi dari alat pengering rumput laut berbasis *solar dryer*. Sketsa ini berfungsi sebagai *blueprint* awal untuk mengidentifikasi dimensi kasar ruang pengering, tata letak rak, *inlet* dan *outlet* udara, serta jalur aliran udara. Sketsa ini nantinya menjadi referensi utama dalam pemodelan 3D yang lebih presisi menggunakan perangkat lunak desain.

4. Menggambar 3D

62

Desain tiga dimensi dibuat menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design (CAD)* Solidworks. Pemodelan 3D dilakukan secara terperinci mencakup semua komponen seperti rangka utama, ruang pengering, *tray*/ rak rumput laut, penutup transparan, dan lubang ventilasi. Tahap ini penting untuk mengidentifikasi integrasi antar komponen, validasi ukuran, serta kompatibilitas geometri terhadap simulasi CFD. Model 3D juga harus mempertimbangkan hal ergonomis dan kemudahan perakitan serta pemeliharaan alat.

5. Memilih Material Komponen

Pemilihan material dilakukan berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomis. Komponen penutup atas dipilih dari kaca *tempered* atau polikarbonat karena memiliki transmisi tinggi dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Material *absorber* dipilih dari pelat aluminium karena memiliki konduktivitas panas tinggi dan mudah menyerap panas matahari, terutama jika dicat hitam *matte*. Rangka alat dipilih dari aluminium atau besi galvanis yang kuat, ringan, dan tahan korosi. Rak pengering dipilih dari *stainless steel* karena bersifat *food-grade*, tidak berkarat, dan mudah dibersihkan. Sifat termal, kekuatan mekanis, serta biaya material menjadi pertimbangan utama dalam proses ini.

6. Simulasi Desain

Model 3D kemudian diekspor ke perangkat lunak CFD Solidworks *Flow Simulation*. Proses simulasi meliputi pembuatan *mesh (discretization)* yang memecah model menjadi elemen-elemen kecil agar dapat dianalisis secara numerik. Setelah itu ditentukan kondisi batas seperti suhu inlet udara, kecepatan aliran, dan intensitas radiasi matahari yang disimulasikan. Model fisika yang digunakan antara lain meliputi aliran fluida, perpindahan panas (konduksi, konveksi, radiasi), serta kemungkinan penambahan humidifikasi.

7. Menggambar Detail Komponen

Jika proses simulasi sudah sesuai dengan parameter desain yang diambil dalam proses desain pengeringan, maka bisa dilanjut dalam tahap gambar detail komponen. Gambar detail disusun untuk setiap komponen pengering. Gambar ini mencakup dimensi lengkap, jenis material, serta anotasi teknis lainnya. Gambar *assembly* (perakitan) juga dibuat untuk menunjukkan hubungan antar komponen dan tata letaknya dalam.

8. Analisis Data

Setelah semua tahap selesai dilakukan dan diperoleh hasil simulasi, dilakukan analisa data untuk mengolah dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD. Parameter-parameter seperti suhu rata-rata di dalam ruang pengering, distribusi kecepatan udara, tekanan, serta variasi suhu pada masing-masing rak pengering dianalisis untuk mengevaluasi kinerja. Data hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan literatur untuk menilai efektivitas desain dan menentukan konfigurasi terbaik. Analisis ini juga melibatkan visualisasi data dalam bentuk grafik kontur, aliran, dan diagram lintasan partikel, yang membantu dalam pemahaman fenomena aliran dan perpindahan panas di dalam *solar dryer* secara lebih komprehensif. Hasil analisis kemudian dijadikan dasar dalam pembahasan dan penelitian.

Untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh dapat dipercaya dan memiliki relevansi dengan kondisi nyata, dilakukan validasi sederhana terhadap literatur. Validasi dilakukan dengan membandingkan suhu dan aliran udara rata-rata di dalam ruang pengering dengan referensi hasil penelitian Bishwash et al. (2017) dan Chandra (2024), yang menunjukkan bahwa suhu udara dalam pengering *indirect solar dryer* umumnya berkisar antara 50–65°C dengan kecepatan aliran 0,3–0,6 m/s pada intensitas matahari $\pm 600 \text{ W/m}^2$.

Simulasi dilakukan dengan asumsi kondisi tunak (*steady state*), aliran inkompresibel, dan proses pengeringan tidak memperhitungkan reaksi kimia atau perubahan fasa (evaporasi air tidak dimodelkan secara eksplisit). Selain itu, lingkungan eksternal seperti radiasi matahari, suhu

dan kelembapan dianggap konstan berdasarkan data rata-rata dari BMKG Kota Cilegon. Rumput laut pada rak diasumsikan sebagai medium padat dengan properti homogen, sehingga efek variasi kadar air antar lapisan tidak diperhitungkan. Asumsi ini dimaksudkan untuk menyederhanakan sistem dan memungkinkan analisis distribusi termal dan aliran udara secara efisien.

13

3.3. Alat yang Digunakan

Dalam melakukan penelitian ini, digunakan perangkat lunak Solidworks 2024 untuk merancang dan membuat desain alat pengering surya, kemudian melakukan simulasi *flow simulation* untuk mengetahui kinerja alat.

BAB IV

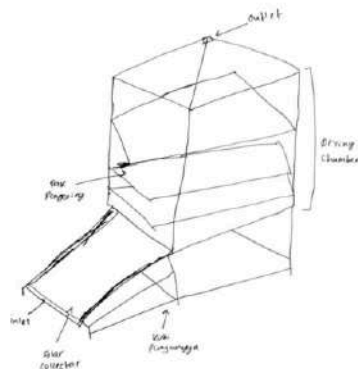
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Desain *Solar Dryer*

Solar dryer dirancang menggunakan perangkat lunak Solidworks. Sebelum merancangnya, ditentukan dimensi setiap bagian-bagian pada *solar dryer* agar dapat berjalan optimal saat simulasi dilakukan. Desain *solar dryer* yang dibuat ini berdasarkan referensi penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, seperti pada penelitian Bishwash et al. (2017). Berikut ini beberapa penjelasan lengkapnya terkait desain *solar dryer* yang digunakan pada penelitian ini.

4.1.1. Sketsa

Sebelum merancang model tiga dimensi *solar dryer*, langkah yang tepat adalah menggambar sketsanya terlebih dahulu. Hal ini bertujuan untuk mempermudah merancang model 3D di perangkat lunak Solidworks agar sesuai dengan perkiraan yang digambar. Sketsa gambar mencakup semua bagian pada *solar dryer*, mulai dari kaki penyangga, *solar collector*, kaca, *drying chamber*, dan juga rak pengering.

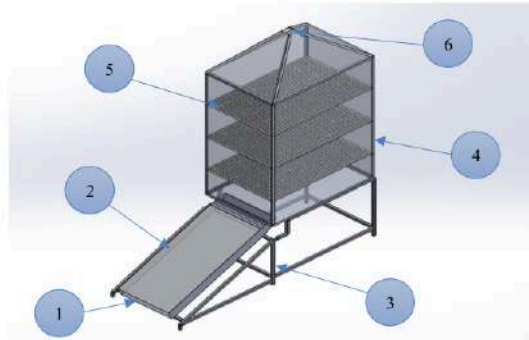


Gambar 4.1 Sketsa Model *Solar Dryer*

4.1.2. Model 3D

Model tiga dimensi *solar dryer* dirancang menggunakan perangkat lunak CAD Solidworks dengan tipe *indirect solar dryer*. Desain mencakup *solar collector* sebagai pemanas udara, rangka kaki sebagai penopang, serta *drying chamber* sebagai ruang utama pengeringan. Geometri alat didesain secara sederhana dan modular untuk mempermudah fabrikasi serta memastikan efisiensi termal dan aliran udara. Berikut ini bagian-bagian pada sistem *solar dryer*:

1. *Inlet Udara*
2. *Solar Collector* (termasuk kaca 4 mm)
3. Rangka Kaki
4. *Drying Chamber*
5. Rak Pengering
6. *Outlet Udara*



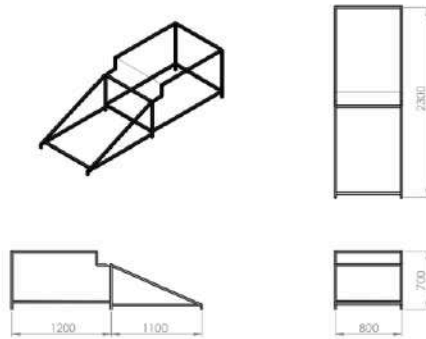
Gambar 4.2 *Indirect Solar Dryer*

4.1.3. Dimensi

Desain *solar dryer* memiliki dimensi yang telah ditentukan sebelumnya. Dimensi ditentukan berdasarkan referensi penelitian sesuai dengan keadaan lingkungan sebenarnya, sehingga dapat digunakan di kehidupan nyata nantinya. Berikut ini merupakan gambar detail tiap komponen *solar dryer* yang mencakup dimensi dalam satuan milimeter dan sudut pandang gambar.

1. Rangka Kaki

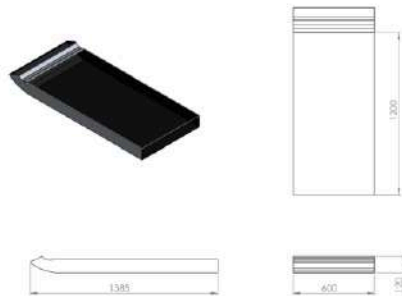
Rangka kaki atau kaki penyangga merupakan salah satu bagian yang sangat penting, fungsinya adalah sebagai penopang bagian-bagian *solar dryer* lainnya agar tetap kokoh ketika digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4.3 Rangka Kaki

2. Solar Collector

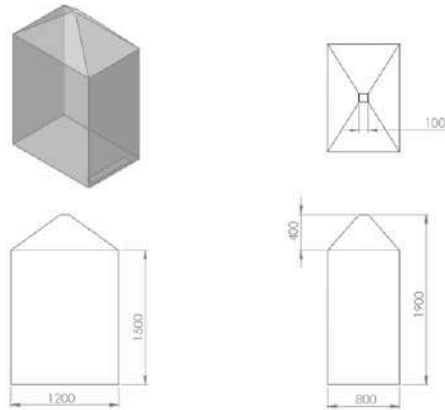
Solar collector atau kolektor surya merupakan bagian yang berperan untuk menyerap energi panas matahari pada pelat aluminium yang dicat hitam pekat dan memiliki tingkat emisivitas yang tinggi agar dapat menyerap energi secara maksimal.



Gambar 4.4 Solar Collector

3. *Drying Chamber*

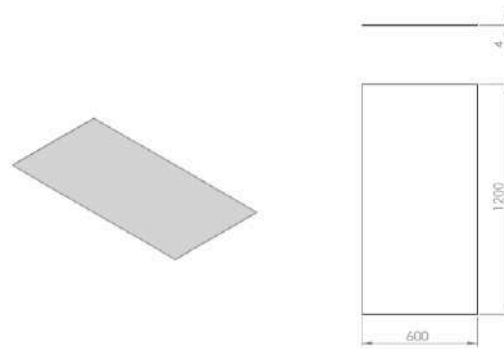
Drying chamber atau ruang pengering merupakan bagian yang berperan untuk menjaga rumput laut dalam pengeringan. Bagian ini juga berperan penting dalam menjaga rumput laut dari udara luar agar tidak masuk secara langsung melalui *drying chamber*.



Gambar 4.5 *Drying Chamber*

4. Kaca

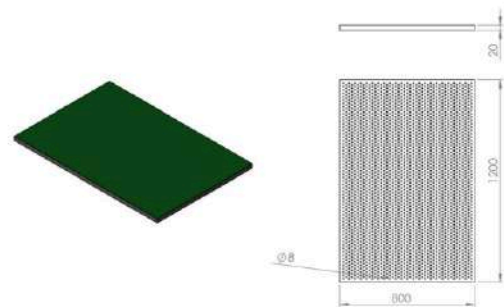
Kaca merupakan salah satu bagian dari *solar collector* yang diletakkan di atas pelat *absorber* yang berfungsi untuk menyalurkan sinar matahari ke *absorber* dan menjebak panas. Kaca juga melindungi komponen dalam dari cuaca dan kerusakan fisik. Memiliki ketebalan sebesar 4 mm.



Gambar 4.6 Kaca 4 mm

5. Rak

Rak menjadi tempat diletakkannya rumput laut untuk dilakukan pengeringan. Di permukaannya diberikan jaring-jaring berbentuk lingkaran berdiameter 8 mm yang berfungsi untuk melancarkan sirkulasi udara agar dapat bergerak bebas, serta dapat membuang uap air dan mencegah kelembaban.



Gambar 4.7 Rak Pengering

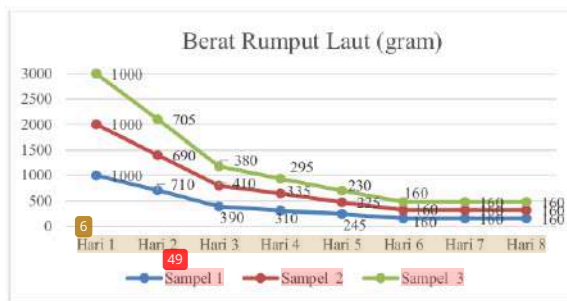
4.1.4. Massa Jenis Rumput Laut

Penelitian yang dilakukan ini menggunakan rumput laut berspesies *Ulva lactuca* sebagai bahan penelitian. Rumput laut jenis ini, diketahui massa jenisnya yaitu berkisar antara 1000 hingga 1100 kg/m³ dalam keadaan basah (*fresh weight*), karena mengandung banyak air (sekitar 80–90%). Namun, dalam keadaan kering rumput laut ini memiliki massa jenis berkisar 300–600 kg/m³ tergantung kadar air akhir dan tingkat kompaksi (Rasyid, 2017). Massa jenis rumput laut ini kemudian digunakan untuk mencari kapasitas dari rak pengering agar dapat diketahui berapa banyak rumput laut yang dapat ditampung dalam sekali pengeringan.

Sebelum itu, telah dilakukan pengeringan rumput laut secara langsung di bawah sinar matahari selama 8 hari untuk mengetahui berat rumput laut dari hari ke hari selama pengeringan berlangsung. Terdapat tiga sampel rumput laut yang berbeda dalam pengeringan ini. Berikut tabel data berat rumput laut *Ulva lactuca* yang dilakukan pengeringan secara langsung di bawah matahari selama 8 hari.

Tabel 4.1 Data Berat *Ulva lactuca*

Hari Ke-	Sampel I	Sampel II	Sampel III
1	1 Kg	1 Kg	1 Kg
2	710 gram	690 gram	705 gram
3	390 gram	410 gram	380 gram
4	310 gram	335 gram	295 gram
5	245 gram	225 gram	230 gram
6	160 gram	160 gram	160 gram
7	160 gram	160 gram	160 gram
8	160 gram	160 gram	160 gram



Gambar 4.8 Grafik Berat Rumput Laut

(Sumber: Ibnu Sina, 2025)

4.1.5. Perhitungan Kapasitas

Setelah mengetahui dimensi rak pengering dan massa jenis rumput laut, dapat ditentukan kapasitas rak pengering untuk mengetahui berapa banyak rumput laut yang dapat disimpan di atas rak pengering dalam sekali proses pengeringan. Perhitungan ini dilakukan agar rak pengering tidak *overload* dalam menyimpan rumput laut yang sedang dikeringkan. Berikut ini perhitungan untuk menentukan kapasitas rak pengering jika diketahui panjang rak sebesar 120 cm dan lebar 80 cm, maka dapat dicari luasnya menggunakan persamaan di bawah ini:

$$L = p \times l$$

$$L = 120 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} = 9600 \text{ cm}^2 = 0,96 \text{ m}^2 \dots\dots\dots(4.1)$$

Diperoleh nilai luas permukaan rak pengering sebesar $0,96 \text{ m}^2$, kemudian diketahui juga ketebalan rak pengering sebesar 2 cm untuk menentukan volume rak, berikut perhitungannya di bawah ini:

$$V = \text{Luas} \times \text{Ketebalan}$$

$$V = 0,96 \text{ m}^2 \times 0,02 \text{ m} = 0,0192 \text{ m}^3 \dots\dots\dots(4.2)$$

Setelah diperoleh nilai volumenya sebesar $0,0192 \text{ m}^3$, langkah selanjutnya adalah menentukan kapasitas rak pengering dengan cara mengalikan massa jenis rumput laut dengan volume rak, berikut perhitungannya di bawah ini:

$$C = \rho \times V$$

$$C = 1050 \text{ kg/m}^3 \times 0,0192 \text{ m}^3 = 20,16 \text{ kg} \dots\dots\dots(4.3)$$

Maka diperoleh kapasitas rak pengering sebesar 20,16 kg atau dibulatkan menjadi 20 kg. Desain *solar dryer* yang dibuat memiliki tiga tingkat rak pengering di dalam *drying chamber*, sehingga total kapasitas rak pengering adalah 60 kg. Maka rumput laut yang dapat dilakukan proses pengeringan dalam satu waktu adalah maksimal sebesar 60 kg.

4.2. Kondisi Batas dan Parameter Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Solidworks *flow simulation* 2024. Simulasi bertipe aliran internal dengan kondisi tunak (*steady state*). Sistem menggunakan koordinat global dan referensi sumbu X. Parameter lingkungan disederhanakan dengan suhu rata-rata lingkungan sebesar 30°C dan kelembapan relatif 70%. Analisis perpindahan panas mencakup konduksi, konveksi, dan radiasi dengan pengaturan permukaan dinding sebagai *blackbody wall*. Pada tahap simulasi ini, parameter yang digunakan sangat bervariasi sesuai dengan kondisi lingkungan sebenarnya. Salah satu parameter penting adalah intensitas radiasi matahari, yang digunakan sebagai dasar untuk menghitung energi panas yang dapat diserap oleh kolektor. Berdasarkan data klimatologi dari BMKG dan berbagai sumber literatur energi surya, intensitas radiasi matahari harian di wilayah Kota Cilegon berada pada kisaran 4,8 kWh/m² per hari. Nilai ini mencerminkan jumlah energi matahari yang jatuh pada setiap meter persegi permukaan bumi di wilayah tersebut dalam satu hari penuh.

Untuk keperluan simulasi dan perhitungan termal, nilai ini kemudian dikonversi ke dalam satuan Watt per meter persegi (W/m²) dalam periode waktu efektif pemanfaatan, yaitu selama 8 jam waktu penyinaran maksimum per hari. Konversi dilakukan dengan membagi total energi harian dengan waktu efektif, sebagai berikut:

$$Intensitas = \frac{4,8 \text{ kWh/m}^2}{8 \text{ jam}} = \frac{4800 \text{ Wh/m}^2}{8 \text{ jam}} = 600 \text{ W/m}^2$$

4.2.1. Mesh

Mesh digunakan dalam simulasi untuk membuat geometri objek atau domain yang akan dilakukan simulasi. Hal ini diperlukan agar simulasi dapat dilakukan sesuai dengan posisi objek model dan tidak keluar dari posisi yang ditentukan. Proses *meshing* dilakukan secara otomatis oleh Solidworks *flow simulation* menggunakan pendekatan *cartesian mesh* (*mesh* kotak). *Mesh* ini dibentuk dalam tiga dimensi dengan struktur *grid hexahedral*. Untuk *global mesh* yang digunakan, yaitu pada level 5 sehingga dapat menangkap detail aliran seperti gradien suhu atau kecepatan dengan lebih presisi. Untuk *local mesh* diletakkan pada permukaan rak pengering, *inlet* dan *outlet* udara. Hal tersebut agar dapat menangkap data pada daerah tersebut lebih akurat.

4.2.2. Kondisi Awal

Sebelum melakukan simulasi, salah satu yang harus dilakukan adalah menentukan parameter untuk kondisi awal *solar dryer* saat sebelum dilakukan simulasi. Berikut ini tabel data parameter kondisi awal yang digunakan untuk simulasi ini.

Tabel 4.2 Kondisi Awal

<i>Thermodynamic parameters</i>	Tekanan Statis: 101325 Pa Suhu: 30°C
<i>Velocity parameters</i>	<i>Velocity vector</i> <i>Velocity in X direction: 0 m/s</i> <i>Velocity in Y direction: 0 m/s</i> <i>Velocity in Z direction: 0 m/s</i>
<i>Solid parameters</i>	<i>Default material: Alloy 42</i> <i>Initial solid temperature: 30°C</i> <i>Radiation Transparency: Opaque</i>
<i>Turbulence parameters</i>	<i>Turbulence intensity and length</i> <i>Intensity: 0,10 %</i> <i>Length: 0,008 m</i>

4.2.3. Kondisi Batas

Kondisi batas ditentukan sesuai kondisi lingkungan sebenarnya. Pemilihan *boundary condition* yang sesuai dengan kondisi fisik riil sangat penting untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan mendekati kenyataan. Misalnya, temperatur *inlet* udara sangat mempengaruhi distribusi suhu di dalam ruang pengering. Simulasi ini diasumsikan dengan berlatar di Kota Cilegon. Maka dari itu, parameter untuk kondisi batas disesuaikan dengan keadaan di Kota Cilegon. Berikut ini tabel data parameter untuk kondisi batas pada simulasi yang dilakukan.

Tabel 4.3 Parameter Kondisi Batas

Parameter	Nilai
Suhu udara masuk	30°C
Kecepatan udara masuk	• 0,3 m/s • 0,5 m/s • 2 m/s • 5 m/s
Suhu lingkungan	30°C
Intensitas Radiasi Matahari	600 W/m ²
Tekanan lingkungan	101325 Pa atau 1 atm

4.2.4. Material

Material yang digunakan dalam simulasi ini sangat bervariasi sesuai dengan bagian-bagian *solar dryer*. Pemilihan material sangat penting agar simulasi yang dijalankan optimal sesuai dengan kondisi asli lingkungan. Terdapat dua macam material, yaitu fluida dan padat. Untuk fluida yang digunakan hanya udara saja, karena simulasi ini hanya mengamati perilaku udara terhadap *solar dryer*. Pada material padat, disesuaikan berdasarkan bagian-bagian *solar dryer* yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut ini material padat yang digunakan dalam simulasi ini.

1. AISI 304

Stainless steel 304 ini digunakan pada rak pengering. Bahan material ini sangat cocok digunakan karena sudah *food-grade*, sehingga aman ditempatkan oleh rumput laut.

2. *Glass*

Bahan *glass* atau kaca digunakan untuk kaca 4 mm sebagai alas tutup pada *solar collector*. Bahan kaca ini memiliki transmissivitas yang baik, sehingga dapat meneruskan panas ke pelat *absorber*.

3. 1060 *Alloy*

Bahan ini digunakan pada *solar collector* karena memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga sangat baik dalam meneruskan energi panas. Pada pelat *absorber*, dicat warna hitam *matte* agar memiliki tingkat emisivitas yang tinggi sehingga dapat menyerap panas secara optimal.

4. *PC High Viscosity*

Salah satu bahan plastik ini digunakan untuk dinding *drying chamber* karena memiliki ketahanan termal yang baik dan dapat mentransmisikan cahaya hingga 85%.

4.2.5. *Goals*

Goals atau sasaran digunakan untuk menentukan apa saja yang harus ditampilkan pada grafik atau kontur seperti suhu setelah simulasi selesai dilakukan. Terdapat *global goals* pada eksperimen ini, yaitu untuk mengetahui hasil simulasi keseluruhan. Berikut ini beberapa *goals* yang digunakan dalam simulasi *solar dryer* ini.

1. *Global Goals*

- a. *Maximum Total Pressure*
- b. *Maximum Temperature (Fluid)*
- c. *Maximum Temperature (Solid)*
- d. *Average Temperature (Fluid)*
- e. *Average Total Temperature*
- f. *Average Velocity*
- g. *Maximum Velocity*

4.2.6. Parameter Pengolahan Simulasi

Untuk mengetahui kinerja dari *solar dryer* yang dirancang menggunakan perangkat lunak Solidworks, data hasil simulasi seperti *goals* diolah kembali untuk mengetahui parameter kinerja *solar dryer*. Berikut ini beberapa parameter penting untuk mengetahui kinerja dari *solar dryer* terhadap simulasi yang dilakukan, yaitu:

1. Kalor Radiasi yang Diserap Udara

Menghitung kalor radiasi dan waktu pengeringan dari hasil simulasi CFD pada *solar dryer* membutuhkan pendekatan termal berbasis energi. Dalam simulasi yang dilakukan, tidak langsung mendapatkan waktu, tapi dapat ditentukan dari hasil distribusi suhu dan aliran udara yang diperoleh. Maka untuk menghitung kalor radiasi, dapat menggunakan persamaan berikut (Incropera, 2006):

$$\dot{Q} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot A \cdot (T_{avg} - T_{amb}) \dots\dots\dots(4.4)$$

Keterangan:

$\dot{Q}$ = Kalor radiasi (W)

ρ = Densitas udara (1,2 kg/m³ pada suhu 30 °C)

c_p = Kapasitas panas udara (sekitar 1005 J/kg·K)

V = Kecepatan udara (m/s)

A = Luas penampang udara masuk (m²)

T_{avg} = Suhu rata-rata dari simulasi (K)

T_{amb} = Suhu lingkungan (K)

2. Waktu Pengeringan

Waktu untuk mengeringkan rumput laut dapat ditentukan dengan persamaan berikut, yaitu (Incropera, 2006):

$$t = \frac{m_{air} \cdot h_{fg}}{\dot{Q}} \dots\dots\dots(4.5)$$

Keterangan:

m_{air} = Massa air (kg)

t = Waktu pengeringan rumput laut (s)

h_{fg} = Kalor laten penguapan air ($h_{fg} = 2260$ kJ/kg)

3. Laju Aliran Massa Uap Air

Dalam menentukan laju aliran massa uap air dari rumput laut selama proses pengeringan, perlu menghitung berapa banyak massa air yang diuapkan per satuan waktu, yaitu (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$\dot{m} = \frac{m_{air}}{t} \dots\dots\dots (4.6)$$

Keterangan:

$\dot{m}$ = Laju aliran massa uap air (kg/s)

m_{air} = Massa air (kg)

t = Waktu pengeringan rumput laut (s)

4. Kalor yang Diserap Pelat Absorber

Kalor yang diserap merupakan energi panas matahari yang diserap oleh kolektor surya. Berikut persamaan untuk menghitung kalor yang diserap, yaitu (Patankar, 1980):

$$Q_{solar} = A \cdot I \cdot \alpha \dots\dots\dots (4.7)$$

Keterangan:

Q_{solar} = Kalor yang diserap (Watt)

A = Luas permukaan kolektor (m²)

I = Intensitas radiasi matahari (W/m²)

α = Emisivitas permukaan kolektor ($\alpha = 0,95$)

5. Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan)

Dalam simulasi pengeringan ini, salah satu tujuannya adalah menguapkan air yang terkandung di dalam rumput laut. Untuk menghitung berapa kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan air pada rumput laut, digunakan persamaan berikut (Patankar, 1980):

$$Q_{uap} = \dot{m} \cdot h_{fg} \dots\dots\dots (4.8)$$

Keterangan:

Q_{uap} = Kalor penguapan (kJ)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa uap air (kg/s)

h_{fg} = Kalor laten penguapan air ($h_{fg} = 2260$ kJ/kg)

6. Efisiensi Sistem *Solar Dryer*

Efisiensi ini ditentukan untuk menunjukkan seberapa efisien sistem memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan udara pengering. Berikut persamaan yang digunakan untuk menentukan efisiensi *solar dryer*, yaitu (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$\eta = \frac{Q_{uap}}{Q_{solar}} \times 100\% \dots \dots \dots (4.9)$$

Keterangan:

η = Efisiensi *solar dryer* (%)

4.3. Hasil Simulasi

Setelah melakukan *input* data, simulasi dapat dijalankan dengan ketentuan yang ada. Hasil simulasi dapat berupa seperti grafik atau kontur berdasarkan parameter yang dimasukkan ke dalam simulasi. Hasil simulasi ini divalidasi secara kualitatif dengan hasil studi oleh Ahmad et al. (2021), yang menunjukkan pola distribusi suhu serupa dalam pengering tipe *greenhouse*. Dalam simulasi yang dilakukan, digunakan variasi parameter untuk kecepatan udara, terbagi ke dalam empat kecepatan udara, yaitu 0,3 m/s, 0,5 m/s, 2 m/s, dan 5 m/s. Hal ini dilakukan untuk membandingkan keempat parameter ini dalam pengaruhnya terhadap kinerja *solar dryer*. Berikut ini tabel *goals* dan tabel *minimum & maximum* hasil simulasi.

1. Kecepatan Udara 0,3 m/s

Tabel 4.4 Goals Kecepatan Udara 0,3 m/s

Parameter	Satuan	Nilai
GG Maximum Total Pressure 1	Pa	101326,68
GG Maximum Temperature (Fluid) 2	°C	110,70
GG Maximum Temperature (Solid) 3	°C	110,70
GG Average Temperature (Fluid) 4	°C	46,92
GG Average Total Temperature 5	°C	46,92
GG Average Velocity 6	m/s	0,073
GG Maximum Velocity 7	m/s	2,585

Tabel 4.5 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 0,3 m/s

Parameter	¹ Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	0,96	¹ 1,15
Pressure [Pa]	101296,11	101326,69
Temperature (Fluid) [°C]	30	110,7
Temperature (Solid) [°C]	35,19	110,7
Velocity [m/s]	0,002	2,585

2. ³Kecepatan Udara 0,5 m/s

Tabel 4.6 Goals Kecepatan Udara 0,5 m/s

Parameter	Satuan	Nilai
GG Maximum Total Pressure 1	Pa	101333,28
²⁰ GG Maximum Temperature (Fluid) 2	°C	107,66
GG Maximum Temperature (Solid) 3	°C	^{107,66}
GG Average Temperature (Fluid) 4	°C	42,55
GG Average Total Temperature 5	°C	42,55
GG Average Velocity 6	m/s	0,11
GG Maximum Velocity 7	m/s	4,229

Tabel 4.7 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 0,5 m/s

Parameter	¹ Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	0,96	¹ 1,15
Pressure [Pa]	101296,11	101333,23
Temperature (Fluid) [°C]	30	107,66
Temperature (Solid) [°C]	34,02	107,66
Velocity [m/s]	0,003	4,229

3. Kecepatan Udara 2 m/s

Tabel 4.8 Goals Kecepatan Udara 2 m/s

Parameter	Satuan	Nilai
GG Maximum Total Pressure 1	Pa	101516,67
GG Maximum Temperature (Fluid) 2	°C	108,14
GG Maximum Temperature (Solid) 3	°C	108,14
GG Average Temperature (Fluid) 4	°C	35,08
GG Average Total Temperature 5	°C	35,08
GG Average Velocity 6	m/s	0,413
GG Maximum Velocity 7	m/s	16,388

Tabel 4.9 Minimum & Maximum Kecepatan Udara 2 m/s

Parameter	Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	0,98	1,15
Pressure [Pa]	101296,11	101473,45
Temperature (Fluid) [°C]	30	108,14
Temperature (Solid) [°C]	32,06	108,14
Velocity [m/s]	0,003	16,388

4. Kecepatan Udara 5 m/s

Tabel 4.10 Goals Kecepatan Udara 5 m/s

Parameter	Satuan	Nilai
GG Maximum Total Pressure 1	Pa	102683,91
GG Maximum Temperature (Fluid) 2	°C	110,25
GG Maximum Temperature (Solid) 3	°C	110,25
GG Average Temperature (Fluid) 4	°C	32,48
GG Average Total Temperature 5	°C	32,48
GG Average Velocity 6	m/s	1,023
GG Maximum Velocity 7	m/s	40,914

Tabel 4.11 *Minimum & Maximum Kecepatan Udara 5 m/s*

Parameter	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
<i>Density (Fluid) [kg/m³]</i>	1,06	1,16
<i>Pressure [Pa]</i>	101296,11	102321,86
<i>Temperature (Fluid) [°C]</i>	30	110,25
<i>Temperature (Solid) [°C]</i>	30,18	110,25
<i>Velocity [m/s]</i>	0,027	40,914

4.3.1. Suhu Permukaan

Dari simulasi yang dilakukan, diperoleh kontur suhu dari setiap bagian *solar dryer* dari distribusi udara pada sistem. Berikut ini merupakan gambar kontur suhu permukaan rak pengering, kaca, dan pelat *absorber* pada tiap-tiap parameter kecepatan udara.

1. Kecepatan Udara 0,3 m/s

Pada kecepatan 0,3 m/s, suhu permukaan pelat *absorber* mencapai nilai maksimum sekitar 66,5°C, menunjukkan penyerapan panas yang optimal dari radiasi matahari. Namun, suhu pada kaca *solar collector* dan permukaan rak menunjukkan nilai lebih rendah, masing-masing sekitar 39–42°C untuk kaca dan 31–36°C untuk rak, terutama rak bawah. Hal ini disebabkan oleh lemahnya aliran udara yang menyebabkan panas dari *absorber* tidak tersebar secara efisien ke seluruh ruang. Akibatnya, pelat *absorber* menjadi terlalu panas sementara rak tidak menerima cukup panas untuk mendukung pengeringan merata.

2. Kecepatan Udara 0,5 m/s

Dengan aliran udara meningkat menjadi 0,5 m/s, pelat *absorber* tetap menjadi titik suhu tertinggi dengan nilai sekitar 68,5°C, menunjukkan peningkatan penyerapan radiasi. Kaca *solar collector* mulai menunjukkan suhu lebih tinggi dan merata, berada di kisaran 40–44°C, mengindikasikan bahwa udara panas mulai mengalir ke atas dan membawa sebagian panas menuju ruang pengering. Permukaan rak mengalami peningkatan suhu lebih

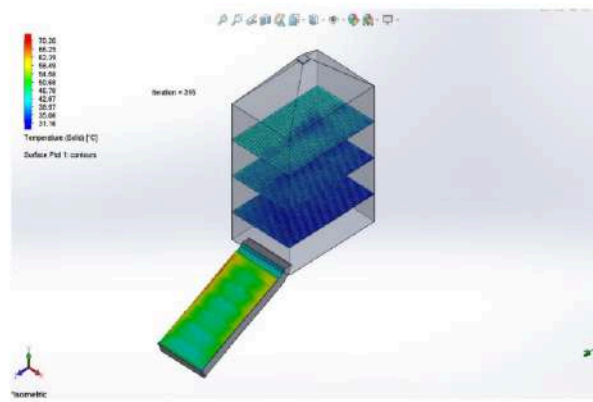
merata, khususnya di rak atas dan tengah yang mencapai 33–38°C, namun rak bawah masih relatif lebih dingin karena sirkulasi udara belum kuat menjangkau seluruh volume.

3. Kecepatan Udara 2 m/s

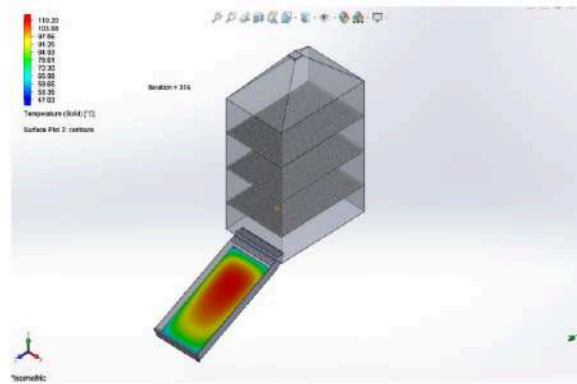
Pada kecepatan 2 m/s, suhu pelat *absorber* meningkat lagi hingga mencapai sekitar 70,5°C, menandakan proses penyerapan panas yang sangat aktif. Kaca *solar collector* mencapai suhu sekitar 45–48°C, dan udara panas mulai menyebar lebih cepat ke ruang pengering. Suhu permukaan rak pun meningkat signifikan, dengan rak atas dan tengah berkisar 37–42°C, sedangkan rak bawah mulai menyamai suhu bagian atas, yaitu sekitar 35–38°C. Aliran udara yang lebih cepat menyebabkan perpindahan panas secara konvektif meningkat, menjadikan distribusi suhu pada rak menjadi lebih seragam dan efisien.

4. Kecepatan Udara 5 m/s

Pada kecepatan tertinggi yaitu 5 m/s, pelat *absorber* menunjukkan suhu maksimum hingga 72°C, dan distribusi panas sangat efisien berkat aliran udara yang sangat kuat. Suhu permukaan kaca *solar collector* naik hingga 47–50°C, menandakan efisiensi serapan radiasi dan konveksi udara panas yang tinggi. Semua permukaan rak, termasuk rak bawah, mencapai suhu tinggi dan merata di kisaran 39–44°C, mencerminkan distribusi suhu yang sangat ideal untuk proses pengeringan cepat dan seragam. Ini menunjukkan bahwa kecepatan 5 m/s memberikan kondisi termal paling stabil dan efisien dalam sistem pengering.



Gambar 4.9 Kontur Suhu Rak Pengering dan Kaca 5 m/s



Gambar 4.10 Kontur Suhu Pelat *Absorber* 5 m/s

4.3.2. Lintasan Aliran

Selain kontur suhu, diperoleh juga *flow trajectories* atau lintasan aliran udara pada sistem yang menampilkan udara bergerak dari *inlet* ke *outlet*. Berikut ini merupakan gambar dari lintasan udara dari tiap-tiap parameter kecepatan udara.

3
1. Kecepatan Udara 0,3 m/s

Pada kecepatan 0,3 m/s, lintasan aliran udara menunjukkan pola aliran yang sangat lambat dan cenderung stagnan di sebagian besar ruang pengering, terutama di area bawah rak. Aliran hanya sedikit masuk dari *inlet* menuju *solar collector*, kemudian bergerak pelan ke ruang pengering dan keluar melalui *outlet*. Karena tidak ada konveksi paksa, pergerakan udara bergantung sepenuhnya pada perbedaan suhu (konveksi alami), menyebabkan distribusi udara panas tidak menjangkau seluruh ruang. Hal ini mengakibatkan penumpukan udara panas di bagian atas dan kurangnya sirkulasi di bagian bawah, sehingga proses pengeringan tidak merata dan efisiensinya rendah.

43
2. Kecepatan Udara 0,5 m/s

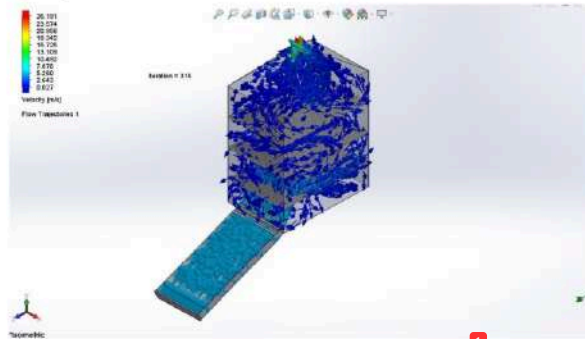
Dengan kecepatan meningkat menjadi 0,5 m/s, aliran udara mulai membentuk lintasan yang lebih jelas dan terarah. Udara mulai masuk melalui *inlet*, bergerak melalui *solar collector*, dan mengalir ke *drying chamber* secara horizontal. Meskipun masih belum terlalu kuat, lintasan ini sudah mulai menjangkau area rak atas dan tengah, namun rak bawah masih minim aliran. Sirkulasi udara mulai terbentuk meski belum sepenuhnya menyelimuti seluruh volume ruang pengering. Hal ini menunjukkan peningkatan performa konveksi, namun distribusi masih terbatas dan belum maksimal untuk mendukung pengeringan seragam.

1
3. Kecepatan Udara 2 m/s

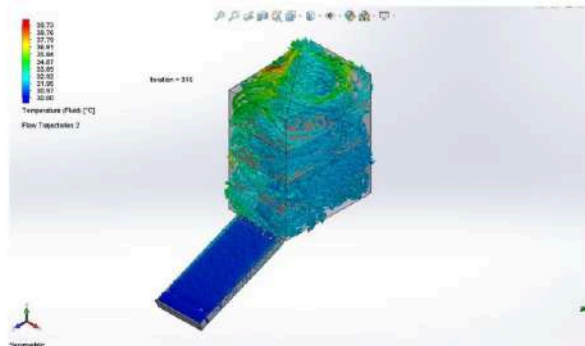
Pada kecepatan 2 m/s, lintasan aliran udara menunjukkan pola yang lebih aktif dan merata. Aliran masuk melalui *inlet* dengan energi kinetik yang cukup untuk mendorong udara panas dari *solar collector* masuk secara menyeluruh ke dalam ruang pengering. Lintasan udara mulai menyelimuti ketiga tingkat rak secara signifikan, termasuk rak bawah, dengan arah aliran yang berputar dan menembus struktur rak.

4. Kecepatan Udara 5 m/s

Pada kecepatan tertinggi yaitu 5 m/s, lintasan aliran udara menjadi sangat dinamis dan turbulen. Aliran udara masuk dengan tekanan tinggi dari *inlet*, menyapu pelat *absorber*, dan bergerak sangat cepat ke dalam ruang pengering. Lintasan udara terdistribusi secara menyeluruh dan menembus seluruh rak dari atas hingga bawah, menghasilkan sirkulasi maksimal. Tidak ada area stagnan yang signifikan, dan udara panas mengalir cepat ke *outlet* sambil membawa uap air dari bahan yang dikeringkan. Ini menunjukkan kondisi aliran yang sangat ideal untuk pengeringan cepat, merata, dan efisien.



Gambar 4.11 Distribusi Kecepatan Udara 5 m/s



Gambar 4.12 Distribusi Suhu Udara 5 m/s

4.4. Analisis Hasil

Setelah melakukan simulasi pengeringan *solar dryer*, dapat dilakukan analisa untuk menentukan kinerja dan efisiensi yang dapat dilakukan *solar dryer*. Hasil simulasi yang diperoleh kemudian diolah kembali untuk melakukan analisis terhadap kinerja dari *solar dryer* yang telah dirancang. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah desain *solar dryer* yang dibuat sudah optimal dan dapat digunakan dalam dunia nyata.

4.4.1. Hasil Perhitungan

Parameter untuk mengetahui kinerja *solar dryer*, dilakukan perhitungan untuk mencari nilai pada setiap parameter yang diketahui. Berikut ini hasil dari perhitungan yang dilakukan, yaitu:

1. Kecepatan Udara 0,3 m/s

a. Laju Pengeringan

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot K \times 0,073 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \\ &(0,6 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}) \times (320,07 \text{ K} - 303,15 \text{ K}) \\ \dot{Q} &\approx 89,38 \text{ W} = 0,08938 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

b. Waktu Pengeringan

a) Untuk 1 kg rumput laut

$$\begin{aligned}t &= \frac{0,84 \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,08938 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \\ t &\approx 21239 \text{ s} \approx 5,9 \text{ jam}\end{aligned}$$

b) Untuk 60 kg rumput laut (sesuai kapasitas rak 3 tingkat)

$$\begin{aligned}t &= \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,08938 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \\ t &\approx 1274380 \text{ s} \approx 354 \text{ jam}\end{aligned}$$

c. Laju Aliran Massa Uap Air

$$\dot{m} = \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg}}{1274380 \text{ s}} \approx 0,0000395 \text{ kg/s}$$

d. Kalor yang Diserap Pelat *Absorber*

$$Q_{\text{solar}} = (1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}) \times 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 0,95 = 410,4 \text{ W}$$

e. Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan)

$$Q_{uap} = 0,0000395 \frac{kg}{s} \times 2260 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{uap} = 0,08927 \text{ W}$$

f. Efisiensi *Solar Dryer*

$$\eta = \frac{0,08927 \text{ W}}{410,4 \text{ W}} \times 100 \%$$

$$\eta \approx 0,021 \%$$

2. ⁹ Kecepatan Udara 0,5 m/s

a. Laju Pengeringan

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 1,2 \frac{kg}{m^3} \times 1005 \frac{J}{kg} \cdot K \times 0,11 \frac{m}{s} \times \\ &\quad (0,6 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}) \times (315,7 \text{ K} - 303,15 \text{ K}) \\ \dot{Q} &\approx 99,89 \text{ W} = 0,09989 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

b. Waktu Pengeringan

a) Untuk 1 kg rumput laut

$$\begin{aligned} t &= \frac{0,84 \text{ kg} \times 2260 \frac{kJ}{kg}}{0,09989 \frac{kJ}{s}} \\ t &\approx 19004 \text{ s} \approx 5,27 \text{ jam} \end{aligned}$$

b) Untuk 60 kg rumput laut (sesuai kapasitas rak 3 tingkat)

$$\begin{aligned} t &= \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg} \times 2260 \frac{kJ}{kg}}{0,09989 \frac{kJ}{s}} \\ t &\approx 1140290 \text{ s} \approx 317 \text{ jam} \end{aligned}$$

c. Laju Aliran Massa Uap Air

$$\dot{m} = \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg}}{1140290 \text{ s}} \approx 0,0000441 \text{ kg/s}$$

d. Kalor yang Diserap Pelat *Absorber*

$$Q_{solar} = (1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}) \times 600 \frac{W}{m^2} \times 0,95 = 410,4 \text{ W}$$

e. Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan)

$$Q_{uap} = 0,0000441 \frac{kg}{s} \times 2260 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{uap} = 0,09966 \text{ W}$$

f. Efisiensi *Solar Dryer*

$$\eta = \frac{0,09966 \text{ W}}{410,4 \text{ W}} \times 100 \%$$
$$\eta \approx 0,024 \%$$

3. Kecepatan Udara 2 m/s

a. Laju Pengeringan

$$\dot{Q} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot \text{K} \times 0,413 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times$$
$$(0,6 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}) \times (308,23 \text{ K} - 303,15 \text{ K})$$
$$\dot{Q} \approx 151,81 \text{ W} = 0,15181 \text{ kJ/s}$$

b. Waktu Pengeringan

a) Untuk 1 kg rumput laut

$$t = \frac{0,84 \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,15181 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}$$
$$t \approx 12505 \text{ s} \approx 3,47 \text{ jam}$$

b) Untuk 60 kg rumput laut (sesuai kapasitas rak 3 tingkat)

$$t = \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,15181 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}$$
$$t \approx 750306 \text{ s} \approx 208 \text{ jam}$$

c. Laju Aliran Massa Uap Air

$$\dot{m} = \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg}}{750306 \text{ s}} \approx 0,0000671 \text{ kg/s}$$

d. Kalor yang Diserap Pelat *Absorber*

$$Q_{\text{solar}} = (1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}) \times 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 0,95 = 410,4 \text{ W}$$

e. Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan)

$$Q_{\text{uap}} = 0,0000671 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$Q_{\text{uap}} = 0,151646 \text{ W}$$

f. Efisiensi *Solar Dryer*

$$\eta = \frac{0,151646 \text{ W}}{410,4 \text{ W}} \times 100 \%$$
$$\eta \approx 0,036 \%$$

4. Kecepatan Udara 5 m/s

a. Laju Pengeringan

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot K \times 1,023 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \\ &(0,6 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}) \times (305,63 \text{ K} - 303,15 \text{ K}) \\ \dot{Q} &\approx 183,58 \text{ W} = 0,18358 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

b. Waktu Pengeringan

a) Untuk 1 kg rumput laut

$$\begin{aligned}t &= \frac{0,84 \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,18358 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \\ t &\approx 10340 \text{ s} \approx 2,87 \text{ jam}\end{aligned}$$

b) Untuk 60 kg rumput laut (sesuai kapasitas rak 3 tingkat)

$$\begin{aligned}t &= \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,18358 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \\ t &\approx 620459 \text{ s} \approx 172 \text{ jam}\end{aligned}$$

c. Laju Aliran Massa Uap Air

$$\dot{m} = \frac{(0,84 \times 60) \text{ kg}}{620459 \text{ s}} \approx 0,0000812 \text{ kg/s}$$

d. Kalor yang Diserap Pelat *Absorber*

$$Q_{\text{solar}} = (1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}) \times 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 0,95 = 410,4 \text{ W}$$

e. Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan)

$$\begin{aligned}Q_{\text{uap}} &= 0,0000812 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ Q_{\text{uap}} &= 0,183512 \text{ W}\end{aligned}$$

f. Efisiensi *Solar Dryer*

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{0,183512 \text{ W}}{410,4 \text{ W}} \times 100 \% \\ \eta &\approx 0,044 \%\end{aligned}$$

4.4.2. Pembahasan

Setelah melakukan perhitungan dari parameter simulasi, diperoleh nilai dari setiap parameter sebagai bukti dalam mengetahui kinerja dari *solar dryer* yang telah dirancang. Berikut ini adalah tabel dari hasil parameter pengolahan data simulasi yang dilakukan.

Tabel 4.12 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 0,3 m/s

Parameter	Nilai
Laju Pengerinan (kJ/s)	0,08938
Waktu Pengerinan (jam)	354
Laju Aliran Massa Uap Air (kg/s)	0,000395
Kalor yang Diserap Pelat <i>Absorber</i> (W)	410,4
Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan) (W)	0,08927
Efisiensi <i>Solar Dryer</i> (%)	0,021

Pada debit udara paling rendah, laju pengeringan yang dihitung hanya 0,08938 kJ/s. Dengan asumsi 60 kg rumput laut (kapasitas penuh tiga rak), panas se-efektif ini baru bisa menguapkan air selama ± 354 jam atau hampir 15 hari kerja terus-menerus dengan waktu terlama di antara semua skenario. Laju aliran massa uap air pun minimal 0,000395 kg/s, menegaskan bahwa evaporasi berlangsung pelan karena udara yang masuk membawa energi termal sangat terbatas. Pelat *absorber* menerima daya radiasi konstan 410,4 W, hanya 0,08927 W benar-benar tersalurkan untuk penguapan air. Ini berarti efisiensi termal sistem diperoleh sebesar 0,021 %, secara praktis hampir seluruh panas hilang lewat konduksi ke struktur atau kembali ke lingkungan sebelum sempat dipakai mengeringkan produk. Kombinasi kecepatan aliran rendah dan distribusi panas yang tak merata menjadikan skenario 0,3 m/s pilihan paling tidak efisien.

Tabel 4.13 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 0,5 m/s

Parameter	Nilai
Laju Pengeringan (kJ/s)	0,09989
Waktu Pengeringan (jam)	317
Laju Aliran Massa Uap Air (kg/s)	0,0000441
Kalor yang Diserap Pelat <i>Absorber</i> (W)	410,4
Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan) (W)	0,09966
Efisiensi <i>Solar Dryer</i> (%)	0,024

Dengan menaikkan kecepatan hingga 0,5 m/s, maka diperoleh laju pengeringan sebesar 0,09989 kJ/s dan memangkas durasi proses menjadi ± 317 jam (sekitar 13 hari). Walau perbaikan ini signifikan dibanding 0,3 m/s, laju aliran massa uap air baru sebesar 0,0000441 kg/s, sehingga kecepatan evaporasi masih tergolong lambat untuk kebutuhan produksi komersial. Energi berguna yang tersalur ke penguapan naik menjadi 0,09966 W, menjadikan efisiensi termal 0,024 %. Kenaikan 0,003 poin persentase ini mengonfirmasi bahwa sedikit peningkatan debit udara memang ikut meningkatkan konveksi internal, tetapi masih belum mampu memanfaatkan daya radiasi kolektor secara memadai. Masih banyak panas terbuang yang seharusnya bisa dioptimalkan dengan isolasi lebih baik dan tata letak aliran yang diatur ulang.

Tabel 4.14 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 2 m/s

Parameter	Nilai
Laju Pengeringan (kJ/s)	0,15181
Waktu Pengeringan (jam)	208
Laju Aliran Massa Uap Air (kg/s)	0,0000671
Kalor yang Diserap Pelat <i>Absorber</i> (W)	410,4
Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan) (W)	0,151646
Efisiensi <i>Solar Dryer</i> (%)	0,036

Dalam kecepatan 2 m/s, memperlihatkan lonjakan performa dengan laju pengeringan yang melonjak ke 0,15181 kJ/s dan waktu proses menurun drastis menjadi ± 208 jam (sekitar 8 ½ hari). Laju aliran massa uap air kini 0,0000671 kg/s, dua kali lebih besar dibanding skenario terendah. Aliran yang lebih kuat mendorong udara panas menembus ketiga tingkat rak, sehingga lebih banyak kelembapan terangkut keluar setiap detik. Walaupun daya radiasi yang masuk tetap 410,4 W, energi yang sungguh-sungguh dipakai untuk penguapan naik menjadi 0,151646 W. Efisiensi termal melompat ke 0,036 %, yaitu meningkat hampir 70 % dibanding kondisi 0,5 m/s. Kenaikan ini menegaskan bahwa konveksi paksa pada level menengah mampu mengurangi rugi panas konduktif dan radiasi balik, membuat lebih banyak energi dapat dimanfaatkan ke proses pengeringan.

Tabel 4.15 Data Hasil Pengolahan Simulasi Kecepatan 5 m/s

Parameter	Nilai
Laju Pengeringan (kJ/s)	0,18358
Waktu Pengeringan (jam)	172
Laju Aliran Massa Uap Air (kg/s)	0,0000812
Kalor yang Diserap Pelat <i>Absorber</i> (W)	410,4
Kalor yang Diterima (Kalor Penguapan) (W)	0,183512
Efisiensi <i>Solar Dryer</i> (%)	0,044

Debit tertinggi 5 m/s menghasilkan laju pengeringan puncak 0,18358 kJ/s dan memangkas durasi total ke ± 172 jam (sekitar 7 hari). Laju aliran massa uap air bertambah lagi menjadi 0,0000812 kg/s, artinya udara yang lebih cepat dan turbulen mengangkut uap air secara efisien keluar dari ruang pengering. Dampak praktisnya, yaitu jumlah produk (rumput laut) harian yang diproses meningkat dan penumpukan kelembapan pada rak bawah berkurang drastis. Energi berguna yang tersalur ke penguapan mencapai 0,183512 W, mendorong efisiensi termal ke 0,044 % yang menjadikan nilai tertinggi di semua skenario,

meski absolutnya masih rendah dibanding target literatur ($> 10\%$). Nilai efisiensi termal lebih dari 10% merupakan acuan umum dalam penelitian dan pengembangan *solar dryer* tipe tidak langsung (*indirect solar dryer*), terutama pada skala eksperimental yang ideal. Angka ini sering disebut dalam literatur ilmiah yang menilai kinerja alat pengering tenaga surya seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Fudholi et al. (2014). Terlihat jelas bahwa konveksi paksa sangat meningkatkan pemanfaatan panas kolektor, tetapi angka efisiensi yang tetap di bawah $0,1\%$ menandakan perlunya desain ulang sistem insulasi, optimasi bentuk saluran, atau penerapan *heat-storage* agar fraksi energi yang hilang bisa ditekan.

5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian tentang simulasi CFD terhadap kinerja *solar dryer*, diperoleh kesimpulan berdasarkan tujuan penelitian yang dilakukan. Berikut ini beberapa kesimpulan yang dapat dilampirkan, antara lain adalah:

1. Distribusi suhu permukaan ruang pengering semakin merata seiring peningkatan kecepatan udara, dengan suhu maksimum tertinggi sebesar $46,65^{\circ}\text{C}$ pada kecepatan 5 m/s. Pada kecepatan rendah (0,3 m/s), distribusi panas tidak merata dan hanya terfokus di rak atas, sedangkan pada kecepatan tinggi, seluruh rak menerima suhu yang relatif seragam, menunjukkan peran penting konveksi paksa dalam pemerataan panas.
2. Lintasan aliran udara menunjukkan pola aliran yang semakin stabil dan menyeluruh pada kecepatan tinggi. Kecepatan 5 m/s menghasilkan aliran turbulen yang menjangkau seluruh rak pengering, termasuk bagian bawah yang sebelumnya stagnan pada kecepatan rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara sangat berpengaruh terhadap efektivitas sirkulasi udara panas dalam ruang pengering.
3. Efisiensi termal sistem meningkat seiring peningkatan kecepatan udara, dari 0,021% pada 0,3 m/s menjadi 0,044% pada 5 m/s, kemudian juga waktu pengeringan meningkat seiring kecepatan udara meningkat, yaitu pada 0,3 m/s selama ± 354 jam, pada 0,5 m/s ± 317 jam, pada 2 m/s ± 208 jam, dan pada 5 m/s selama ± 172 jam. Meskipun meningkat, nilai ini masih jauh dari standar efisiensi optimal ($>10\%$) menurut literatur, sehingga disarankan adanya penyempurnaan desain sistem seperti penambahan isolasi dan peningkatan efisiensi kolektor surya agar energi panas dapat dimanfaatkan secara lebih efektif.

Dalam penelitian simulasi CFD yang telah dilakukan, masih banyak kekurangan dalam melakukan prosedur penelitian dan materi yang disajikan. Berikut ini beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini agar dapat disempurnakan ke depannya, yaitu:

1. Desain *solar dryer* yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat dasar dan statis. Untuk penelitian berikutnya, direkomendasikan melakukan kajian optimasi desain geometri, seperti variasi posisi *inlet-outlet* udara, kemiringan kolektor, atau jumlah rak pengering, menggunakan metode optimasi berbasis CFD.
2. Penelitian ini belum memasukkan model penguapan air secara eksplisit dalam simulasi. Oleh karena itu, studi selanjutnya sebaiknya mengembangkan model pengeringan menggunakan pendekatan *multiphase flow* atau *conjugate heat and mass transfer* untuk mensimulasikan interaksi antara aliran udara panas dan penguapan air dari rumput laut.
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi hasil simulasi CFD dengan data eksperimen lapangan secara langsung. Pengujian alat pengering secara fisik akan memberikan gambaran nyata terhadap performa termal dan efisiensi sistem yang telah disimulasikan. Dengan membandingkan hasil simulasi dan data aktual, dapat diketahui sejauh mana tingkat keakuratan model CFD dalam merepresentasikan kondisi nyata, serta memperkuat keandalan rekomendasi desain yang dihasilkan dari simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amer, B. M. A., Hossain, M. A., & Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.016>
- Bishwash, H., Bobadi, S., & Professor, A. (2017). *Design and Material Optimisation of a Solar Dryer-Tray Section* (Vol. 137).
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655.
- El-Sebaei, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>
- FAO. (2020). *Global Status of Seaweed Production and Utilization*.
- Fudholi, A., Othman, M. Y., M. Y., R., M. H., Y., M., Z. A., & Sopian, K. (2011). Design and testing of solar dryer for drying kinetics of seaweed in Malaysia. *Recent Research in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine*, 119–124.
- Fudholi, A., Othman, M. Y., Ruslan, M. H., Yahya, M., Zaharim, A., & Sopian, K. (2011). *Design and Testing of Solar Dryer for Drying Kinetics of Seaweed in Malaysia*. WSEAS.
- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y., & Ruslan, M. H. (2014). Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.072>
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834–854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>

- Incropera, F. P., & D. D. P. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Janna, W. S. (2018). *Engineering Heat Transfer*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439883143>
- Jauch, C., Islam, S. M., Sørensen, P., & Bak Jensen, B. (2007). Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilisation. *Renewable Energy*, 32(14), 2334–2349. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.009>
- Kaviany, M., & Kanury, A. (2002). Principles of Heat Transfer. *Applied Mechanics Reviews*, 55(5), B100–B102. <https://doi.org/10.1115/1.1497490>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan RI. (2021). *Statistik Sumber Daya Laut dan Pesisir Indonesia*.
- Lee, M., Yang, M., Choi, S., Shin, J., Park, C., Cho, S.-K., & Kim, Y. M. (2019). Sequential Production of Lignin, Fatty Acid Methyl Esters and Biogas from Spent Coffee Grounds via an Integrated Physicochemical and Biological Process. *Energies*, 12(12), 2360. <https://doi.org/10.3390/en12122360>
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2017). Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia*, 109, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.041>
- Mujumdar, A. S. (2000). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press.
- Ndeo, Y. P., Koehuan, V. A., & Bunganaen, W. (2021). *Simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD) Rumah Pengering Kopi Menggunakan Plastik UltraViolet (UV) Solar Dryer*. <http://ejurnal.undana.ac.id/index.php/LJTMU>
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing.
- Rasyid, A. (2017). Evaluation of nutritional composition of the dried seaweed *Ulva lactuca* from Pameungpeuk waters, Indonesia. *Tropical Life Sciences Research*, 28(2), 119–125. <https://doi.org/10.21315/tlsr2017.28.2.9>
- Sopian, K., Fudholi, A., Daud, W. R. W., & Othman, M. Y. (2005). Review of solar drying systems and applications. *Renewable Energy*, 25(3), 479–490.
- Thomas, D., P Olivier, T. M., Marcel, E., Hélène, D., & Alexis, K. (2018). Numerical Simulation of Effect of Topology on the Airflow Characteristics

inside an Indirect Solar Dryer. *American Journal of Energy Research*, 6(1), 1–

7. <https://doi.org/10.12691/ajer-6-1-1>

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Second Edition). Pearson Education. www.pearsoned.co.uk/versteeg

15%

SIMILARITY INDEX

14%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	2%
2	eprints.untirta.ac.id Internet Source	1%
3	repository.ub.ac.id Internet Source	1%
4	docplayer.info Internet Source	1%
5	Submitted to Universitas Muria Kudus Student Paper	1%
6	text-id.123dok.com Internet Source	<1%
7	mesin.ft.untirta.ac.id Internet Source	<1%
8	www.biotifor.or.id Internet Source	<1%
9	ejurnal.undana.ac.id Internet Source	<1%
10	repository.umsu.ac.id Internet Source	<1%
11	eprints2.undip.ac.id Internet Source	<1%
12	adoc.pub	

13	123dok.com Internet Source	<1 %
14	repository.unika.ac.id Internet Source	<1 %
15	ejournals.itda.ac.id Internet Source	<1 %
16	geograf.id Internet Source	<1 %
17	Submitted to Universitas Bengkulu Student Paper	<1 %
18	Submitted to Universitas Indonesia Student Paper	<1 %
19	repository.usd.ac.id Internet Source	<1 %
20	Submitted to Coventry University Student Paper	<1 %
21	Lita Astini, Syarifudin Nur, Yusarwan Yamadipo, Anggini Fuji Astuti. "IDENTIFIKASI JENIS MAKROALGA DI PANTAI LINAU KABUPATEN KAUER PROVINSI BENGKULU", Jurnal Agroqua: Media Informasi Agronomi dan Budidaya Perairan, 2024 Publication	<1 %
22	pt.scribd.com Internet Source	<1 %
23	pubs.sciepub.com Internet Source	<1 %

Raway Village: Meningkatkan Ransangan
Program Through White Copra Processing in
Totopo Village, Gorontalo Regency", Jurnal
Pengabdian Pada Masyarakat, 2025

Publication

25	docplayer.com.br Internet Source	<1 %
26	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	<1 %
27	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	<1 %
28	Submitted to University of Sydney Student Paper	<1 %
29	devidameriza.blogspot.com Internet Source	<1 %
30	eprints.polsri.ac.id Internet Source	<1 %
31	journal.ipb.ac.id Internet Source	<1 %
32	repository.univ-tridianti.ac.id Internet Source	<1 %
33	repository.upnvj.ac.id Internet Source	<1 %
34	www.slideshare.net Internet Source	<1 %
35	pdfcoffee.com Internet Source	<1 %
36	repository.unj.ac.id Internet Source	

37	repository.unukase.ac.id Internet Source	<1 %
38	Essalhi Hajar, Tadili Rachid, Bargach Mohammed Najib. "Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test.", Energy Procedia, 2017 Publication	<1 %
39	Submitted to Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Student Paper	<1 %
40	eprints.amikompurwokerto.ac.id Internet Source	<1 %
41	Submitted to itera Student Paper	<1 %
42	www.semanticscholar.org Internet Source	<1 %
43	repository.petra.ac.id Internet Source	<1 %
44	sinta.unud.ac.id Internet Source	<1 %
45	www.scribd.com Internet Source	<1 %
46	Submitted to Universitas Bunda Mulia Student Paper	<1 %
47	adoc.tips Internet Source	<1 %
48	eprints.uty.ac.id Internet Source	<1 %

50	penerbitadab.id Internet Source	<1 %
51	repository.umy.ac.id Internet Source	<1 %
52	sigma.ac.id Internet Source	<1 %
53	www.gilarpost.com Internet Source	<1 %
54	www.ijmer.com Internet Source	<1 %
55	www.tcpel.com Internet Source	<1 %
56	D Nurba, S S Mardjan, D Wulandani, L O Nelwan, I D M Subrata. "Evaluation of airflow, temperature, and RH in the deep bed dryer for paddy grain with several combinations of floors and air distribution pipes using CFD", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024 Publication	<1 %
57	Submitted to La Trobe University Student Paper	<1 %
58	Raharja Puja Gustika, Ignatius Riyadi Mardiyanto, Indriyani Indriyani. "Analisis Efektivitas High Pressure Heater (HPH) 7 PT. Z", Jurnal Surya Teknik, 2024 Publication	<1 %
59	aliahsan27.blogspot.com Internet Source	

60	ar.scribd.com Internet Source	<1 %
61	dewey.petra.ac.id Internet Source	<1 %
62	digilib.itb.ac.id Internet Source	<1 %
63	elib.pdii.lipi.go.id Internet Source	<1 %
64	fr.scribd.com Internet Source	<1 %
65	qdoc.tips Internet Source	<1 %
66	repository.unmul.ac.id Internet Source	<1 %
67	repository.unpar.ac.id Internet Source	<1 %
68	taghfirin.wordpress.com Internet Source	<1 %
69	Sitti Arsyh Rahmah, Nicolas Titahelu, Antoni Simanjuntak. "ANALISIS EFEKTIVITAS PENERING KONVEKTIF LIMBAH PANAS RUMPUT LAUT DENGAN KELEMBABAN RELATIF BERBEDA", Journal Teknik Mesin, Elektro, Informatika, Kelautan dan Sains, 2024 Publication	<1 %
70	Submitted to University of Johannesburg Student Paper	<1 %

eprints.walisongo.ac.id

72	es.scribd.com Internet Source	<1 %
73	garuda.ristekbrin.go.id Internet Source	<1 %
74	id.scribd.com Internet Source	<1 %
75	idoc.pub Internet Source	<1 %
76	iieta.org Internet Source	<1 %
77	jurnal.kemendag.go.id Internet Source	<1 %
78	pdfslide.net Internet Source	<1 %
79	philips.wordpress.com Internet Source	<1 %
80	publikasi.unitri.ac.id Internet Source	<1 %
81	repository.radenintan.ac.id Internet Source	<1 %
82	repository.stiedewantara.ac.id Internet Source	<1 %
83	repository.um.ac.id Internet Source	<1 %
84	ttu.ee Internet Source	<1 %

www.coursehero.com

86

www.warenvergleich.de
Internet Source

<1 %

87

eprints.undip.ac.id
Internet Source

<1 %

88

Allo Sarira Pongsapan, Rombe Allo.
"KARAKTERISTIK PENERANGAN SURYA (SOLAR DRYER) DENGAN TURBIN VENTILATOR", Jurnal Teknik AMATA, 2022
Publication

<1 %

89

S. H. Chan. "Transport Phenomena In Combustion, Volume 1 - Proceedings of the Eighth International Symposium on Transport Phenomena in Combustion (ISTP-VIII) held in San Francisco, California, July 16-20, 1995 Organized under the Auspices of the Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering", Routledge, 2024
Publication

<1 %

90

docplayer.nl
Internet Source

<1 %

91

journal.umy.ac.id
Internet Source

<1 %

Exclude quotes Off
Exclude bibliography On

Exclude matches < 1 words