

**PERANCANGAN MESIN PENGERING SAMPAH TIPE *ROTARY*
KAPASITAS 100 KG/JAM DENGAN MEMANFAATKAN
GAS SISA REAKTOR TOREFAKSI**

Skripsi

Oleh

**DAVID ROBBY MUGHNI
2015021014**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**PERANCANGAN MESIN PENGERING SAMPAH TIPE *ROTARY*
KAPASITAS 100 KG/JAM DENGAN MEMANFAATKAN
GAS SISA REAKTOR TOREFAKSI**

Oleh

**DAVID ROBBY MUGHNI
2015021014**

(Skripsi)

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PERANCANGAN MESIN PENGERING SAMPAH TIPE *ROTARY* KAPASITAS 100 KG/JAM DENGAN MEMANFAATKAN GAS SISA REAKTOR TOREFAKSI

Oleh

DAVID ROBBY MUGHNI

Masalah pengelolaan sampah di Universitas Lampung (UNILA) menjadi perhatian, dengan total timbulan sampah mencapai 770 kg per hari. Untuk mengatasi masalah sampah di UNILA, teknologi torefaksi dapat memberikan solusi dengan mengonversi sampah menjadi energi berupa bahan bakar padat. Pada umumnya sampah organik memiliki kandungan air yang tinggi, untuk itu diperlukan proses pengeringan sampah organik sebelum proses torefaksi.

Penelitian ini merancang mesin pengering tipe *rotary* untuk mengurangi kandungan air pada sampah daun. Tujuan penelitian ini meliputi perhitungan spesifikasi teknis *dryer*, estimasi kebutuhan energi, analisis perpindahan panas, dan perhitungan heat loss, serta pembuatan gambar teknik dari *dryer* tersebut. Penelitian dimulai dengan studi literatur terkait teknologi pengeringan, karakteristik sampah di UNILA, dan prinsip perpindahan panas. Berdasarkan analisis tersebut, dipilih konsep pengering tipe *rotary* yang memanfaatkan gas panas sisa dari proses torefaksi. Perhitungan spesifikasi dan kebutuhan energi *dryer* dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel, diikuti oleh pembuatan desain 3D dengan *software* SolidWorks.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *rotary dryer* dirancang untuk mengeringkan sampah daun dengan sistem pemanasan langsung, menggunakan gas panas dari reaktor torefaksi yang dihisap oleh *ID Fan*. Dengan kapasitas 100 kg/jam, *dryer* memiliki kemiringan yang dapat disesuaikan. *Rotary dryer* dilapisi *glasswool* setebal 0,05 m untuk meminimalisir heat loss. Energi yang dibutuhkan proses pengeringan mencapai 25,32 kW, dengan *heat loss* sebesar 0,3 kW. Kesimpulan penelitian mengindikasikan spesifikasi *rotary dryer* dengan diameter 0,9874 m, panjang 3,5 m, kecepatan putaran 1 rpm, dan waktu pengeringan 30 menit. Desain hasil penelitian ini diharapkan dapat direalisasikan ke dalam alat nyata dan pengembangan simulasi untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

Kata kunci: pengering putar, sampah organik, daun, energi, perancangan.

ABSTRACT

DESIGN OF A ROTARY TYPE WASTE DRYER MACHINE CAPACITY 100 KG/HOUR USING RESIDUAL GAS FROM A TORREFACTION REACTOR

By

DAVID ROBBY MUGHNI

The issue of waste management at the University of Lampung (UNILA) has become a concern, with a total waste generation reaching 770 kg per day. To address the waste problem at UNILA, torrefaction technology can provide a solution by converting waste into energy in the form of solid fuel. Generally, organic waste has a high moisture content, thus requiring a drying process for organic waste before the torrefaction process.

This research designs a rotary dryer to reduce the moisture content in leaf waste. The objectives of this study include calculating the technical specifications of the dryer, estimating energy requirements, analyzing heat transfer, calculating heat loss, and creating technical drawings of the dryer. The research begins with a literature review related to drying technology, characteristics of waste at UNILA, and principles of heat transfer. Based on this analysis, a rotary dryer concept is chosen that utilizes waste heat gas from the torrefaction process. The specifications and energy requirements for the dryer are calculated using Microsoft Excel, followed by the creation of a 3D design using SolidWorks.

The research results indicate that the rotary dryer is designed to dry leaf waste with a direct heating system, using hot gas from the torrefaction reactor drawn in by an ID Fan. With a capacity of 100 kg/hour, the dryer features an adjustable inclination. The rotary dryer is insulated with 0.05 m thick glass wool to minimize heat loss. The energy required for the drying process reaches 25.32 kW, with a heat loss of 0.3 kW. The study concludes with specifications for the rotary dryer, including a diameter of 0.9874 m, a length of 3.5 m, a rotational speed of 1 rpm, and a drying time of 30 minutes. The design resulting from this research is expected to be realized into a real device and further developed in simulation to achieve more accurate results.

Keywords: rotary dryer, organic waste, leaves, energy, design

Judul Skripsi : **PERANCANGAN MESIN PENGERING
SAMPAH TIPE *ROTARY* KAPASITAS 100
KG/JAM DENGAN MEMANFAATKAN GAS
SISA REAKTOR TOREFAKSI**

Nama Mahasiswa : David Robby Mughni

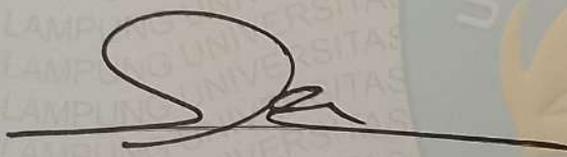
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021014

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

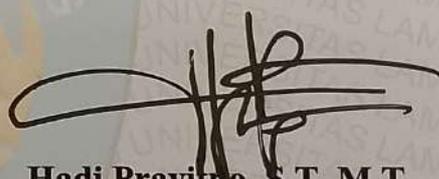
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing



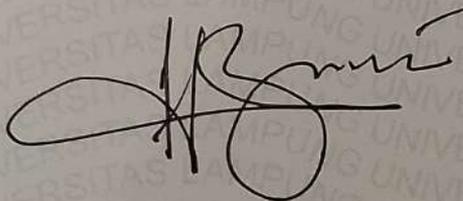
Dr. Amrul, S.T.,M.T
NIP. 197103311999031003

Ketua Jurusan Teknik Mesin

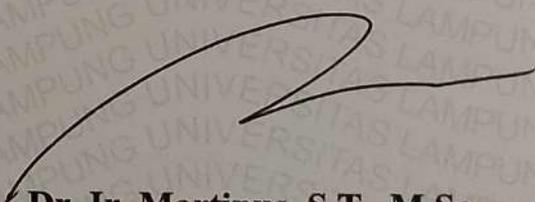


Hadi Prayitno, S.T.,M.T.
NIP.198805142019031012

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003

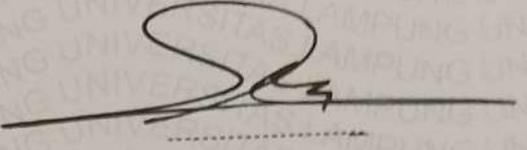


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

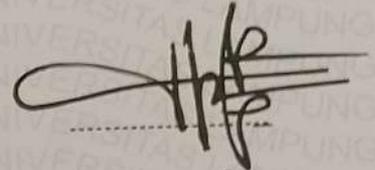
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

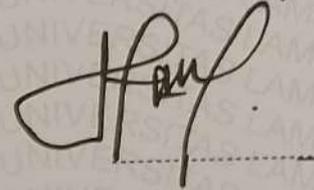
Ketua : Dr. Amrul, S.T., M.T.



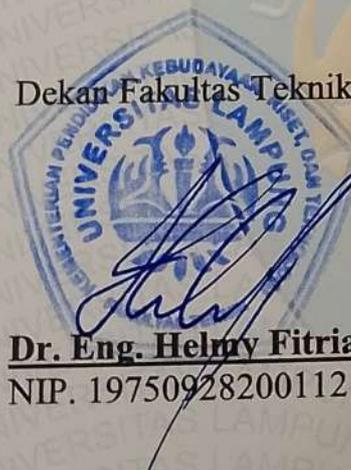
Anggota Penguji : Hadi Prayitno., S.T., M.T.



Penguji Utama : Dr. Harmen, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 9 Agustus 2024

LEMBAR PERNYATAAN

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERATURAN REKTOR No. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, ~~1~~ - 10 - 2024

Pembuat Pernyataan



David Robby Mughni
NPM 2015021014

MOTTO HIDUP

لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا

”Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

فَاصْبِرْ إِنَّ وَعْدَ اللَّهِ حَقٌّ

“Maka bersabarlah kamu, karena sesungguhnya janji Allah itu benar”

(QS. Ar-Rum: 60)

“don't rush the process, let yourself grow at your own pace. stop comparing your life to what other people do”

SANWACANA

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam tak lupa penulis haturkan kepada nabi akhir zaman Rasulullah Muhammad SAW yang telah membimbing manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh hidayah. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam laporan ini penulis mengambil judul ***“Perancangan Mesin Pengering Sampah Tipe Rotary Kapasitas 100 kg/Jam Dengan memanfaatkan Gas Sisa Reaktor Torefaksi”***. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ayahanda Supriyatin dan Ibunda Sumarti yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis dapat tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Saudara kandung penulis, Aditya Nurhidayat, Riska Utari, dan Rival Fauzi Ahmadani, yang memberikan semangat, doa, dan dukungannya menjalankan kuliah.
3. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
6. Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
7. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
8. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
9. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
10. *GPGK Team*, para sahabat terbaik yang telah memberikan banyak kebahagiaan, selalu hadir memberi dukungan, semangat, dan tawa yang membuat hari-hari lebih istimewa.
11. *Torefaction team*, terdiri dari Pico Tamara Berlia, Andri Febriansyah, Ichsanul Abidin dan Tazzidane Olsen Ba'albaqi yang telah membantu dalam mengerjakan penelitian skripsi ini.
12. Teman-teman Angkatan 2020 yang telah memberikan bantuan selama penulis menginjakkan kaki di bangku perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penuliskhususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Rejosari pada tanggal 15 Juli 2002 sebagai anak ke 3 (tiga) dari 4 (empat) bersaudara, dari pasangan Ayahanda Supriyatin dan Ibunda Sumarti. Penulis bertempat tinggal di Rejosari, Natar, Lampung Selatan. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 3 Rejosari hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 1 NATAR yang diselesaikan tahun 2017 dan SMK NEGERI 2 BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2020. Kemudian pada tahun 2020, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di **PT PERKEBUNAN NUSANTARA VII UNIT BEKRI** yang berlokasi di Desa Sinar Banten, Kecamatan Bekri, Lampung Tengah pada tahun 2023. Penulis menyelesaikan kerja praktik dengan menghasilkan laporan kerja praktik dengan judul **“ANALISIS STEAM YANG DIBUTUHKAN PADA PROSES PELUMATAN BUAH KELAPA SAWIT PADA UNIT *DIGESTER* DI PT PERKEBUNAN NUSANTARA VII UNIT BEKRI”**.

Tahun 2024 penulis melakukan penelitian yang tergabung dalam tim Torefaksi dengan judul Penelitian **“PERANCANGAN MESIN PENERING SAMPAH TIPE *ROTARY* KAPASITAS 100 KG/JAM DENGAN MEMANFAATKAN GAS SISA REAKTOR TOREFAKSI”** dibawah bimbingan Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Hadi Prayitno, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
MENGESAHKAN	iv
LEMBAR PERNYATAAN	v
MOTTO HIDUP	vi
SANWACANA	vii
RIWAYAT HIDUP	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sampah.....	5
2.2 Pengeringan.....	7
2.3 Teknologi Pengeringan (<i>Dryer</i>)	9
2.3.1 Pengering Putar (<i>Rotary dryer</i>).....	10
2.3.2 <i>Continuous Fluidized Bed Dryer</i>	12
2.3.3 <i>Belt Conveyor Dryer</i>	13
2.3.4 <i>Spray Dryer</i>	14
2.3.5 <i>Tower Dryer</i>	15
2.3.6 Pengering Baki (<i>Tray Dryer</i>)	16
2.3.7 <i>Tunnel Dryers</i> (Pengering Terowongan).....	17
2.3.8 Pengering Drum	18
2.3.9 <i>Screw conveyor Dryer</i>	19
2.4 Prinsip-prinsip Desain Rekayasa	21
2.5 Desain <i>Dryer</i>	23

2.5.1	Perhitungan Spesifikasi <i>Dryer</i>	24
2.5.2	Perhitungan Kebutuhan Energi	28
2.5.3	Perpindahan Panas dan Kehilangan Panas	31
2.5.4	Perhitungan Energi Sistem	35
III.	METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1	Tahapan Penelitian	38
3.1.1	Studi Literatur	38
3.1.2	Pemilihan Konsep	38
3.1.3	Perhitungan <i>Rotary dryer</i>	39
3.1.4	Pembuatan Gambar Desain	39
3.1.5	Kesimpulan	40
3.2	Alur Tahap Pelaksanaan	40
3.3	Alat Penelitian	41
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1	Data dan Perhitungan	42
4.1.1	Perhitungan Spesifikasi <i>Rotary dryer</i>	42
4.1.2	Perhitungan Kebutuhan Energi	46
4.1.3	Perhitungan Q_{loss} dan Perpindahan Panas	49
4.1.4	Perhitungan Energi Sistem	54
4.2	Pemodelan 3D	57
4.2.1	Desain <i>Rotary dryer</i>	58
4.2.2	Bagian-bagian <i>Rotary dryer</i>	59
4.3	Pembahasan <i>Rotary dryer</i>	63
V	PENUTUP	71
5.1	Kesimpulan	71
5.2	Saran	72
	DAFTAR PUSTAKA	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Direct Rotary dryer</i>	11
Gambar 2.2 Mesin pengering jenis <i>fluidized bed</i>	12
Gambar 2.3 Skema <i>single conveyor belt dryer</i>	13
Gambar 2.4 <i>Spray dryer</i> jenis <i>cylinder-on-cone</i> skala pilot.	14
Gambar 2.5 Mesin pengering jenis <i>tower dryer</i>	15
Gambar 2.6 Pengering baki (<i>tray dryers</i>).	16
Gambar 2.7 Diagram mekanisme drum <i>dryer</i>	19
Gambar 2.8 Mesin pengering jenis <i>screw conveyor dryer</i>	20
Gambar 2.9 Alternatif pengaturan <i>flight rotary dryer</i>	26
Gambar 2.10 Skema lapisan dinding dan distribusi temperatur pada <i>dryer</i>	31
Gambar 3.1 Skema proses torefaksi skala pilot.	39
Gambar 3.2 Diagram alur penelitian.	40
Gambar 4.1 Skema lapisan <i>rotary dryer</i>	50
Gambar 4.2 Skema resistensi pada <i>rotary dryer</i>	51
Gambar 4.3 (a) <i>Rotary dryer</i> sebelum diatur sudut kemiringan. (b) <i>Rotary</i> dengan pengaturan sudut kemiringannya.	58
Gambar 4.4 Instalasi <i>rotary dryer</i> pada sistem torefaksi skala pilot.	59
Gambar 4.5 (a) Desain <i>rotary dryer</i> . (b) Komponen penggerak pada <i>rotary dryer</i>	60
Gambar 4.6 <i>Induced Draft Fan (IDF)</i> pada <i>rotary dryer</i>	64
Gambar 4.7 <i>Flights</i> pada <i>rotary dryer</i>	65
Gambar 4.8 Perhitungan mekanikal perancangan <i>rotary dryer</i>	66
Gambar 4.9 Pengaruh derajat kemiringan terhadap waktu tinggal.	66
Gambar 4.10 Perhitungan kebutuhan energi <i>rotary dryer</i>	68
Gambar 4.11 (a) Perhitungan resistansi dan <i>heat loss</i> pada <i>rotary dryer</i> . (b) Perhitungan temperatur pada setiap lapisan dinding <i>rotary dryer</i>	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data densitas dan kandungan air sampah (Hardiyani, dkk., 2022).....	6
Tabel 4.1 Parameter awal perancangan spesifikasi <i>rotary dryer</i>	42
Tabel 4.2 Data perhitungan kebutuhan energi.....	46
Tabel 4.3 Data awal perpindahan panas dalam <i>dryer</i>	50
Tabel 4.4 Data parameter awal untuk energi proses.....	54
Tabel 4.5 Hasil perhitungan spesifikasi <i>rotary dryer</i>	56
Tabel 4.6 Hasil perhitungan kebutuhan energi <i>dryer</i>	56
Tabel 4.7 Hasil perhitungan perpindahan panas dan <i>heat loss</i>	57
Tabel 4.8 Hasil perhitungan energi sistem pada <i>rotary dryer</i>	57

DAFTAR SIMBOL

A_t	= luas penampang drum (m^2)
A_s	= total luas aliran penampang (m^2)
α	= sudut kemiringan ($^\circ$)
C_{ps}	= panas spesifik material ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
CV_s	= kapasitas panas material masuk, kJ
CV_d	= kapasitas panas material keluar, kJ/kg
D	= diameter (m)
g	= percepatan gravitasi, m/s^2
h	= koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
$h_{udara@80^\circ C}$	= enthalpy udara $80^\circ C$, kJ/kg
$h_{udara@100^\circ C}$	= enthalpy udara $100^\circ C$, kJ/kg
k	= konduktivitas termal ($W/m \cdot ^\circ C$)
l	= panjang silinder <i>rotary dryer</i> (m)
L	= panas laten penguapan (kJ/kg)
m_i	= massa drum dan daun, kg
M_a	= kandungan air material (%)
\dot{m}_{gc}	= laju aliran udara tambahan, kg/s
\dot{m}_{gh}	= laju aliran gas panas dari reaktor, kg/s
$\dot{m}_{g.in}$	= massa gas panas masuk, kg/s
$\dot{m}_{g.out}$	= massa gas panas keluar, kg/s
\dot{m}_s	= laju aliran massa material (kg/s)
\dot{m}_w	= laju air yang hilang (kg/s)
N	= putaran <i>dryer</i> (rpm)
P	= daya <i>rotary dryer</i> , kW
P_{fan}	= Daya <i>fan</i> (kW)
P_m	= daya motor yang diperlukan, kW

ρ	= densitas gas panas, kg/m ³
ρ_s	= densitas daun (kg/m ³)
Q	= kapasitas <i>fan</i> , m ³ /s
Q_d	= energi total yang dibutuhkan selama proses pengeringan (kW)
Q_{dry}	= energi untuk penguapan (kW)
$Q_{g.in}$	= Energi gas panas masuk, kW
$Q_{g.out}$	= energi gas panas keluar, kW
Q_{in}	= energi masuk, kW
Q_{loss}	= kehilangan energi panas (kW)
Q_{out}	= energi keluar, kW
Q_{ph}	= energi yang dibutuhkan untuk pemanasan (kW)
$Q_{s.in}$	= energi material masuk, kW
$Q_{s.out}$	= energi material keluar, kW
Q_{sistem}	= Energi sistem, kW
r	= jari-jari silinder (m)
R	= resistansi (°C/W)
R_{total}	= resistansi total (°C/W)
S	= persentase luas penampang efektif ditempati padatan di dalam <i>dryer</i> (%)
S_l	= Slope <i>rotary dryer</i> (m/m)
t	= waktu tinggal di dalam <i>dryer</i> (menit)
T	= torsi <i>rotary dryer</i> , kN.m
T_0	= temperatur material masuk (°C)
T_1	= temperatur material keluar (°C)
T_{gc}	= temperatur udara tambahan, °C
T_{gh}	= temperatur gas panas dari reaktor, °C
$T_{g.in}$	= temperatur gas yang masuk ke dalam <i>rotary dryer</i> , °C
T_i	= temperatur di dalam silinder (°C)
T_o	= temperatur di luar silinder (°C)
v_s	= <i>solid average velocity</i> (m/s)
ΔT	= beda temperatur (°C)

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah sampah merupakan tantangan berkelanjutan yang harus segera diatasi, termasuk di lingkungan kampus yang merupakan salah satu sumber timbulan sampah yang signifikan. Universitas Lampung menghasilkan sekitar 770 kg sampah setiap hari, dengan komposisi 65,34% sampah organik (503,118 kg) dan 34,66% sampah anorganik (266,882 kg) (Yuliandri, dkk., 2019). Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Universitas Lampung (TPST UNILA) merupakan fasilitas yang dikembangkan untuk mengelola sampah kampus, dengan fokus utama saat ini pada pengomposan sampah organik. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam kapasitas dan jenis sampah yang dapat diolah, serta memerlukan waktu yang cukup lama.

Perlunya pendekatan yang lebih efisien untuk mengatasi timbulan sampah di UNILA, seperti proses termal untuk mengubah sampah menjadi energi dalam bentuk bahan bakar. Salah satu teknologi termal yang dapat dipertimbangkan adalah torefaksi, yang merupakan proses termokimia di mana bahan dipanaskan pada temperatur 200-300°C tanpa adanya oksigen. Studi yang dilakukan menunjukkan bahwa torefaksi dapat menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas nilai kalor yang setara dengan beberapa jenis batu bara sub-bituminous (Amrul, dkk., 2019). Namun, implementasi torefaksi memerlukan komponen tambahan seperti proses pengeringan bahan mentah sebelum masuk ke dalam reaktor torefaksi.

Pengeringan merupakan pengambilan sebagian atau seluruh air yang terdapat pada suatu material. Dalam proses torefaksi, material yang akan ditorefaksi sebisa mungkin memiliki kandungan air (*moisture content*) yang rendah. Hal

tersebut merupakan persoalan utama yang akan mempengaruhi besarnya biaya yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi proses torefaksi. Sementara itu, sampah yang ada saat ini secara umum maupun di Universitas Lampung memiliki kandungan air yang tinggi (basah). Sampah organik terutama dedaunan memiliki kandungan air 40 % (Hardiyani, dkk., 2022). Jika material umpan dalam keadaan basah dimasukkan ke dalam reaktor torefaksi, maka reaktor torefaksi memerlukan energi yang besar hanya untuk menguapkan air yang terdapat pada material umpan tersebut. Karena itu, untuk mengurangi sebagian besar kandungan air pada material umpan tersebut, maka dilakukanlah proses pengeringan terlebih dahulu.

Proses pengeringan dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk penggunaan teknologi pengering dengan pemanasan yang memanfaatkan energi buatan, seperti mesin pengering (*dryer*). Sumber panas yang digunakan pada *dryer* dapat berupa gas panas yang dialirkan dan berkontak langsung dengan material (*direct heating*). Dengan tipe pemanasan secara *direct heating*, maka mesin pengering dapat memanfaatkan gas sisa/gas buang dari reaktor torefaksi. Gas panas yang berasal dari *burner* akan dihisap oleh sebuah *induced draft fan* (IDF) untuk dilewatkan kedalam reaktor torefaksi dan selanjutnya gas panas tersebut akan diteruskan kedalam *dryer*. *Dryer* harus dapat bekerja secara kontinu supaya dapat melakukan proses pengeringan secara terus-menerus.

Salah satu teknologi pengeringan yang cocok untuk mengeringkan sampah daun sebelum masuk ke dalam reaktor torefaksi yaitu *rotary dryer*. *Rotary dryer* terdiri dari silinder yang berputar sehingga bahan yang terdapat di dalamnya ikut berputar dan dapat mengeringkan seluruh bagian bahan secara merata (Nugroho, 2018). Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan dilakukan perancangan mesin pengering dengan sistem *rotary* sebagai komponen pendukung dalam sistem torefaksi skala pilot, untuk menurunkan kandungan air pada sampah daun yang akan dilakukan proses torefaksi. Sehingga dibutlah penelitian ini dengan judul **"Perancangan Mesin**

Pengering Sampah Tipe *Rotary* Kapasitas 100 kg/jam Dengan Memanfaatkan Gas Sisa Reaktor Torefaksi”

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung spesifikasi teknis pengering tipe *rotary* kapasitas 100 kg/jam.
2. Menghitung kebutuhan energi *dryer* untuk mengeringkan sampah daun.
3. Menganalisis perpindahan panas yang terjadi di dalam *dryer* dan menghitung besarnya *heat loss* pada *dryer*.
4. Membuat gambar teknik pengering tipe *rotary* kapasitas 100 kg/jam.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis pengering yang dirancang merupakan mesin pengering dengan sistem *rotary* dengan pemanasan secara langsung.
2. *Dryer* dirancang sebagai pengering sampah organik berupa daun yang terdapat di lingkungan Universitas Lampung.
3. Membuat gambar desain 3D menggunakan *software* desain.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan uraian latar belakang masalah dari penelitian ini secara jelas, tujuan dari diadakannya penelitian ini, batasan masalah yang

diberikan agar hasil penelitian lebih terarah, dan berisi tentang sistematika penulisan yang digunakan penulis pada penulisan laporan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang landasan teori dari beberapa literatur yang mendukung penelitian ini yang meliputi: penjelasan proses pengeringan, keadaan sampah di Unila saat ini, dan jenis-jenis teknologi pengeringan yang terdapat saat ini.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang metode-metode yang digunakan penulis dalam pelaksanaan penelitian seperti waktu penelitian, bagaimana penelitian yang akan dilakukan, dan alur tahapan pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang perhitungan spesifikasi *dryer* yang dibuat, kebutuhan energi untuk proses pengeringan, perhitungan dan analisis perpindahan panas, dan desain *dryer* dalam bentuk 3D.

V. PENUTUP

Berisi kesimpulan penelitian yang dilakukan dan saran yang dapat diberikan dari penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sampah

Sampah merujuk pada residu yang dihasilkan dari berbagai kegiatan produksi baik di tingkat domestik (rumah tangga) maupun industri. Definisi ini mencakup segala jenis bahan buangan yang dihasilkan oleh aktivitas manusia, baik itu dari rumah tangga, komersial, industri, maupun aktivitas lainnya (Yuliandari, dkk., 2019). Menurut Undang-undang No 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, sampah didefinisikan sebagai sisa kegiatan sehari-hari manusia atau proses alam dalam bentuk padat atau semi padat, baik berupa zat organik maupun anorganik, yang dapat terurai atau tidak terurai, yang dianggap sudah tidak bermanfaat lagi dan dibuang ke lingkungan.

Sampah berasal dari berbagai sumber, mencakup pemukiman penduduk, jalanan perkotaan, tempat umum, industri, dan bahkan area hutan. Pemukiman penduduk merupakan salah satu sumber utama sampah, yang dihasilkan oleh setiap rumah tangga dalam bentuk organik seperti sisa makanan, maupun non-organik seperti plastik, kertas, dan material lainnya. Sementara itu, tempat-tempat umum seperti pasar dan toko sering kali menghasilkan sampah yang terdiri dari sisa makanan, sayuran busuk, serta material lainnya seperti kertas, kaleng, dan plastik. Di lingkungan taman, sekolah, dan perguruan tinggi, sampah yang dihasilkan umumnya mencakup organik seperti daun dan ranting, serta non-organik seperti plastik dan kertas.

Komposisi sampah dapat mengalami variasi yang signifikan disebabkan oleh berbagai faktor seperti kondisi cuaca, musim, tingkat sosial ekonomi, pendapatan perkapita, jenis kemasan produk, dan frekuensi pengumpulan sampah. Studi yang dilakukan oleh Hardiyani, dkk. (2022) yang

menginvestigasi karakteristik dan komposisi sampah di Tempat Pengelolaan Sampah (TPS) Tanjung Tembaga, Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, memberikan informasi tentang densitas dan kandungan air dari berbagai jenis sampah yang terkumpul di lokasi tersebut. Data sampah tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Data densitas dan kandungan air sampah (Hardiyani, dkk., 2022).

Jenis Sampah	Densitas	Kandungan Air
Daun	125,21	40
Sisa makanan	326,68	60
Kertas	102,98	10
Kayu	137,31	10
Kain	199,67	30
Karet	163,49	0
Plastik	100,23	10
Kaca	231,24	0
Residu	257,78	0
B3	211	0

Sampah merupakan campuran beragam bahan dengan tingkat kandungan air yang relatif tinggi dan densitas energi yang rendah. Di Indonesia, khususnya di perkotaan besar, sampah telah diidentifikasi sebagai salah satu tantangan utama. Namun, jika dikelola dengan baik, sampah memiliki potensi untuk diubah menjadi barang yang lebih bermanfaat dan bernilai tinggi. Salah satu pemanfaatan potensial sampah adalah sebagai sumber bahan bakar alternatif. Peran sampah sebagai sumber potensial untuk pengembangan bahan bakar alternatif telah diakui, terutama di kota-kota besar di Indonesia. Sebagai contoh, nilai kalor rata-rata sampah kota mencapai sekitar 25,2 MJ/kg, menunjukkan adanya potensi energi yang signifikan yang dapat dieksplorasi melalui pengolahan sampah (Amrul, dkk., 2019).

Pada tahun 2019, dilakukan penelitian karakterisasi sampah di lingkungan Universitas Lampung oleh Anungputri, dkk., di TPST UNILA. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, timbunan sampah tersebut 40% nya terdiri dari sampah jalanan yang didominasi oleh sampah daun di area kampus. Untuk itu, perlunya upaya serius untuk mengatasi masalah sampah dan mengoptimalkan pemanfaatannya. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah menggunakan teknologi konversi termal, seperti teknologi torefaksi, yang dapat mengubah sampah menjadi bahan bakar padat yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi alternatif. Sebelum sampah diolah menjadi bahan bakar padat melalui proses torefaksi, penting untuk mengurangi kandungan air dalam sampah tersebut semaksimal mungkin. Hal ini krusial karena kandungan air yang tinggi dapat mengurangi efisiensi proses torefaksi dan mempengaruhi kualitas akhir produk bahan bakar. Oleh karena itu, perlunya dilakukan proses *pre-treatment*, seperti pengeringan, untuk mengurangi kandungan air dalam sampah sebelum dilakukan proses torefaksi.

2.2 Pengeringan

Pengeringan merupakan tahap krusial dalam berbagai sektor industri untuk mengurangi kandungan air dalam suatu bahan dengan tujuan menghasilkan produk kering yang sesuai spesifikasi. Pengeringan melibatkan transfer panas dari udara panas ke permukaan bahan, sehingga mengurangi kadar air di permukaan tersebut. Transfer panas ini terjadi karena adanya perbedaan suhu yang signifikan antara bahan yang akan dikeringkan dan udara panas yang diarahkan ke atasnya. Secara umum, pengeringan merujuk pada proses menghilangkan sejumlah kecil air dari bahan dengan bantuan panas, menghasilkan bahan kering dengan kadar air yang lebih rendah. Proses ini dilakukan dengan cara mengalirkan udara panas yang tidak mengandung uap air yang jenuh melalui bahan yang akan dikeringkan, di mana udara panas tersebut berperan sebagai medium pengering yang memberikan energi panas untuk menguapkan air dan mengeluarkan uap air.

Proses pengeringan terjadi melalui fenomena fisik, yaitu penguapan. Secara umum, operasi pengeringan tidak hanya terbatas pada penghilangan air, tetapi juga berlaku untuk zat cair lainnya yang dapat menghasilkan padatan kering. Bahan yang mengalami proses pengeringan berinteraksi dengan udara panas, dan panas ini dipindahkan dari udara ke bahan yang masih basah, yang mengakibatkan penguapan air ke dalam udara. Produk akhir dari proses pengeringan ini dapat berupa material dengan bentuk fisik tertentu seperti serbuk, lembaran tipis, atau butiran. Berbagai metode pengeringan dapat diterapkan, termasuk konveksi panas, konduksi, radiasi, pemanasan listrik, atau kombinasi dari metode-metode tersebut (Rosyidi, dkk., 2022). Proses pengeringan dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu karakteristik dari udara pengering yang digunakan dan sifat-sifat bahan yang akan dikeringkan (Barus, dkk., 2022).

Faktor-faktor yang berkaitan dengan udara pengering mencakup:

- a. Temperatur: Semakin tinggi temperatur udara, proses pengeringan akan berlangsung lebih cepat karena meningkatkan energi panas yang diperlukan untuk penguapan.
- b. Kecepatan aliran udara: Semakin cepat aliran udara, pengeringan juga akan semakin cepat karena udara yang bergerak dengan kecepatan tinggi mempercepat perpindahan panas.
- c. Kelembaban udara: Proses pengeringan akan melambat pada udara yang lebih lembab karena udara yang lembab memiliki kapasitas terbatas untuk menyerap uap air tambahan.
- d. Arah aliran udara: Sudut arah aliran udara terhadap posisi bahan mempengaruhi kecepatan pengeringan. Sudut yang lebih kecil dapat menyebabkan bahan mengering lebih cepat.

Faktor-faktor yang berkaitan dengan sifat bahan melibatkan:

- a. Ukuran bahan: Semakin kecil ukuran bahan, proses pengeringan akan semakin cepat karena luas permukaan kontak yang lebih besar antara bahan dan udara.

- b. Kadar air: Semakin rendah kadar air yang dikandung oleh bahan, pengeringan akan berlangsung lebih cepat karena air lebih mudah menguap pada bahan yang memiliki kadar air yang lebih sedikit.

Kandungan air dalam suatu bahan mencerminkan jumlah total air yang terkandung dalam bahan tersebut, termasuk air yang bersifat bebas maupun air yang terikat. Selama proses pengeringan, terjadi penurunan kadar air dalam bahan, dan besarnya penurunan tersebut bervariasi tergantung pada jumlah air yang menguap (Triadi, dkk., 2021). Pada tahap awal proses pengeringan, terjadi penguapan air bebas, diikuti oleh penguapan air terikat. Secara umum, proses pengeringan dapat dibagi menjadi dua tahap laju pengeringan, yaitu laju pengeringan konstan dan laju pengeringan menurun.

Laju pengeringan konstan terjadi pada fase awal pengeringan, di mana penguapan air terutama berasal dari air bebas yang berada di permukaan bahan. Setelah air di permukaan bahan habis, terjadi migrasi air dan uap air dari bagian dalam bahan ke permukaan bahan melalui proses difusi. Tahap ini dibatasi oleh kadar air kritis (*critical moisture content*). Air yang menguap terdiri dari air bebas yang berada di permukaan bahan dan menjadi yang pertama kali mengalami penguapan. Apabila air di permukaan bahan telah habis, terjadi migrasi air dan uap air dari bagian dalam bahan ke permukaan bahan melalui difusi. Migrasi ini dipicu oleh perbedaan konsentrasi atau tekanan uap di dalam dan di luar bahan.

2.3 Teknologi Pengeringan (*Dryer*)

Pengering dirancang dalam berbagai tipe yang berbeda, yang dipilih berdasarkan metode transfer panas yang digunakan untuk mengeringkan bahan. Proses pengeringan adalah upaya untuk menghilangkan atau memisahkan air dari suatu bahan dengan menggunakan energi panas. Hasil dari proses ini adalah bahan kering dengan kadar air yang seimbang dengan

kondisi udara normal. Secara umum, pengering dapat dibagi menjadi dua jenis utama: pengering langsung dan pengering tidak langsung.

Pengering langsung adalah jenis yang paling umum digunakan di industri. Namun, meskipun populer, pengering ini memiliki efisiensi termal yang relatif rendah karena kesulitan dalam mengambil kembali panas laten dari uap air yang terkandung dalam gas buang. Pemanasan langsung dapat dilakukan dengan cara mengarahkan nyala api langsung ke bahan yang dikeringkan atau dengan mencampurkan gas pembakaran dengan udara tambahan untuk menurunkan suhu campuran yang bersentuhan dengan bahan tersebut.

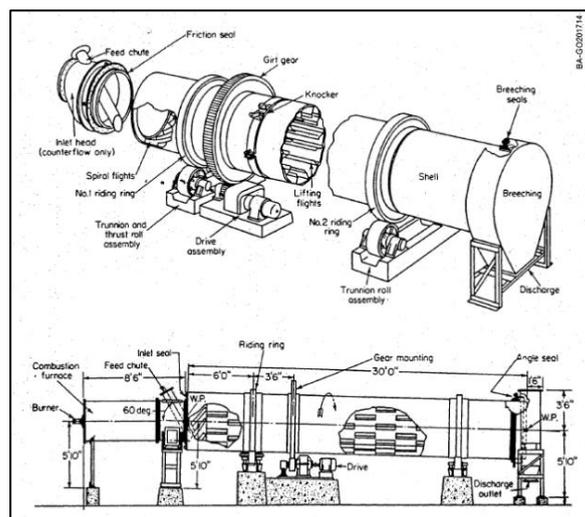
Di sisi lain, pengering tidak langsung, atau yang dikenal juga sebagai *indirect dryer*, memungkinkan gas pembakaran untuk melewati ruang di sekitarnya atau di dalam ruang pengering tanpa bersentuhan langsung dengan bahan. Panas dalam pengering tidak langsung umumnya diangkut menggunakan uap, gas panas, atau cairan termal sebagai media perpindahan panas. Permukaan perpindahan panas pada umumnya memiliki temperatur yang berkisar antara 40°C hingga sekitar 300°C (Lawanangkul, 2013). Berikut adalah beberapa jenis tipe pengering yang umum digunakan dalam industri:

2.3.1 Pengering Putar (*Rotary dryer*)

Pada pengering putar, konstruksinya terdiri dari tabung silinder besar yang berputar, yang didukung oleh balok baja. Kemiringan pengering sedikit condong agar material dapat mengalir melalui pengering dengan bantuan gravitasi. Bahan-bahan ini disiramkan oleh aliran udara panas dengan temperatur 80°C hingga 600°C saat melewati pengering. *Rotary dryer* memiliki beberapa keunggulan, antara lain cocok untuk aplikasi berkapasitas besar dan distribusi ukuran partikel yang tidak merata, operasi yang berkelanjutan dan aplikasi yang serbaguna, serta biaya operasional dan pemeliharaan yang rendah (Susanto, dkk., 2021). Gambar *Rotary dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Pada *rotary dryer*, panas diperoleh melalui pembakaran bahan bakar atau pemanasan udara dengan *steam*. Proses pemanasan dilakukan dengan udara panas yang kontak langsung dengan bahan padat, mengalir berlawanan arah dengan aliran bahan padat tersebut. *Rotary dryer* ideal untuk mengeringkan bahan padat dengan syarat material berupa granular atau kristal, tidak lengket untuk menghindari menempel pada dinding, dan mudah dipindahkan secara konvensional. Umpan dimasukkan secara kontinu pada satu ujung, sementara udara panas masuk dari ujung lainnya. Silinder yang terletak miring secara spesifik memungkinkan umpan untuk bergerak melalui peralatan ini.

Di dalam silinder, terdapat *flights* yang melekat pada dinding dan berfungsi untuk mengangkat serta menyebarkan umpan melalui udara panas. Perubahan temperatur dalam pengering tergantung pada sifat bahan, kandungan kelembaban, temperatur media pemanas, dan temperatur akhir yang diinginkan. *Rotary dryer* memiliki beberapa keunggulan, seperti kemampuan untuk mengeringkan baik lapisan luar maupun dalam suatu padatan, pencampuran yang efisien, memastikan pengeringan merata, operasi yang kontinu, dan konsumsi daya listrik yang rendah (Susanto, dkk., 2021).



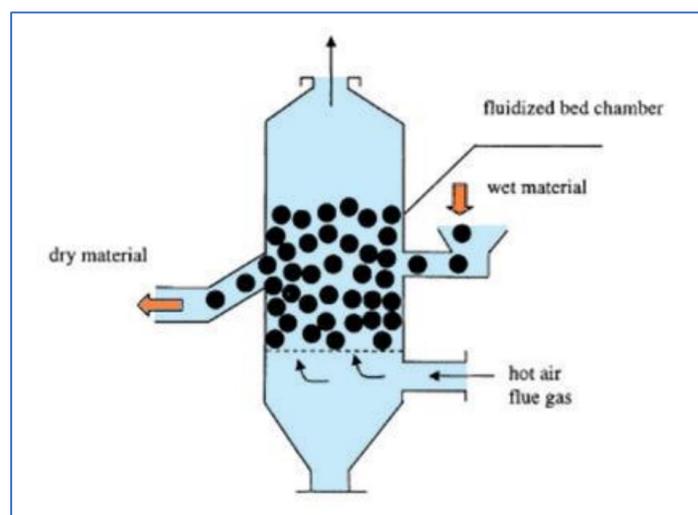
Gambar 2.1 *Direct Rotary dryer*.

(Sumber: Lawanangkul, 2013)

2.3.2 Continuous Fluidized Bed Dryer

Metode pengeringan *fluidized* merupakan inovasi yang luas digunakan dalam sektor industri untuk mengeringkan bahan partikel padat. Keunggulan utama sistem *fluidized bed* terletak pada tingginya turbulensi yang dihasilkan di dalam *bed* atau ruang pengeringan, menghasilkan pertukaran panas dan massa yang optimal, serta pencampuran yang efisien dari bahan padat di dalam *bed*. Sistem ini juga efektif dalam mengendalikan temperatur, yang berperan penting dalam menjalankan proses pengeringan secara efisien untuk bahan yang sensitif terhadap panas, seperti produk makanan atau farmasi (Shakidi, 2017).

Continuous fluidized bed dryer adalah pengering yang menggunakan prinsip fluidisasi. Prinsip kerja mesin pengering sistem fluidisasi adalah penghembusan udara panas oleh kipas peniup (*blower*) melalui suatu saluran ke atas bak pengering. Sementara itu, udara panas juga disirkulasikan melalui sistem filter untuk menciptakan sirkulasi udara yang optimal, meningkatkan laju pertukaran panas, dan akhirnya mencapai efisiensi energi yang lebih baik. Skema diagram *fluidized bed dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

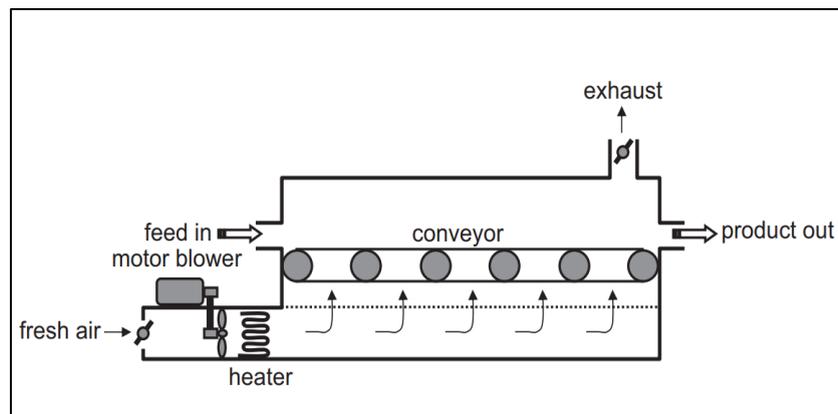


Gambar 2.2 Mesin pengering jenis *fluidized bed*.

(Sumber: Shakidi, 2017)

2.3.3 Belt Conveyor Dryer

Belt conveyor dryer adalah sistem pengeringan dengan sabuk (*belt*) yang berjalan dan beroperasi secara terus-menerus. Jenis ini efektif untuk mengeringkan berbagai produk makanan, termasuk potongan buah dan sayuran serta bahan padatan. *Dryer* ini terdiri dari unit pemanasan, kipas sirkulasi udara, ruang pengeringan, dan sabuk *conveyor* (Gambar 2.3). Material ditempatkan di atas *conveyor* dan bergerak melalui ruang pengeringan dengan kecepatan *conveyor* dari masukan hingga keluaran produk. Pengaturan waktu pengeringan dikendalikan dengan mengatur kecepatan *conveyor*. Untuk waktu pengeringan lebih lama, digunakan pengering *conveyor* bertingkat, dengan *conveyor* disusun secara horizontal atau vertikal. Penataan vertikal memungkinkan pengering yang lebih pendek, tetapi tinggi pengering meningkat seiring penambahan *conveyor* (Sabarez, 2016).



Gambar 2.3 Skema *single conveyor belt dryer*.

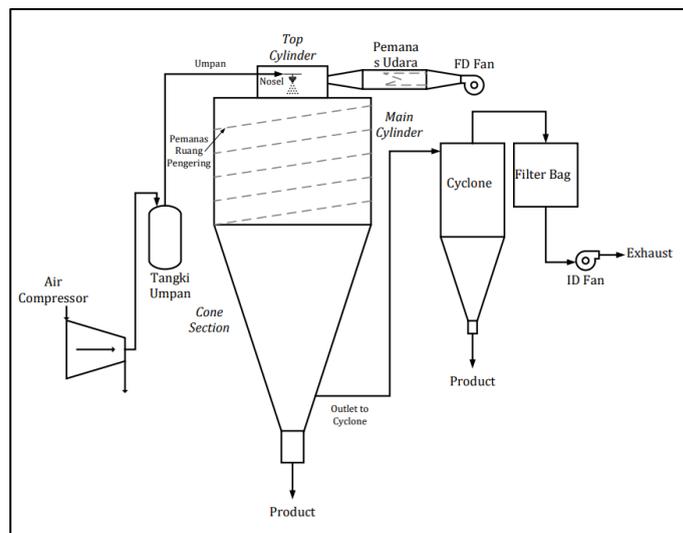
(Sumber: Sabarez, 2016)

Dalam pengering *belt conveyor* bertingkat (vertikal), produk bergerak bolak-balik. Aliran udara pengering dapat diatur menjadi searah, berlawanan arah, atau campuran, dengan perpindahan antar tahap *conveyor* untuk perubahan orientasi dan pencampuran produk, meningkatkan keseragaman pengeringan. Pengering dapat terdiri dari beberapa bagian berturut-turut, di mana temperatur, kecepatan udara,

dan kecepatan *conveyor* dikendalikan untuk meningkatkan laju pengeringan dan efisiensi energi. Meskipun memberikan kapasitas tinggi dan kualitas produk yang konsisten, pengering *conveyor* memerlukan investasi yang lebih besar dibandingkan dengan pengering terowongan.

2.3.4 *Spray Dryer*

Pengeringan *spray* adalah proses pengeringan cepat dari cairan menjadi bubuk dengan menggunakan gas panas. Panas dan udara bersih diangkut ke kolom *exhaust* menggunakan kipas hisap. Cairan disemprotkan ke dalam kolom menjadi tetesan yang sangat kecil untuk menghasilkan penguapan yang cepat. metode ini juga disukai oleh industri untuk cairan sensitif termal seperti obat-obatan. *Spray dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Spray dryer* jenis *cylinder-on-cone* skala pilot.

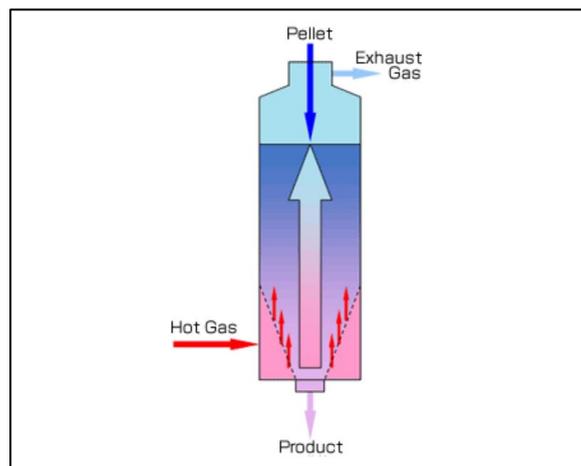
(Sumber: Alwan, dkk., 2021)

Metode pengeringan sembur (*spray drying*) merupakan suatu teknik pengolahan untuk mengolah bahan yang berada dalam fase cair, baik berupa partikel suspensi maupun koloid, dengan cara menyemprotkan cairan tersebut sehingga terbentuk butiran halus yang kemudian

mengering menjadi partikel padat. Medium pengering yang sering digunakan adalah udara kering dengan tingkat kelembapan tertentu. Proses pengeringan sembur telah menjadi pilihan utama dalam berbagai industri seperti makanan, farmasi, dan mineral untuk menghasilkan produk berupa bubuk kering. Proses pengeringan sembur melibatkan empat tahap utama, yaitu atomisasi atau penyemprotan, kontak antara tetesan cairan dengan medium pengering, penguapan air di dalam tetesan, dan pemisahan produk kering dari medium pengering (Alwan, dkk., 2021).

2.3.5 *Tower Dryer*

Tower dryer adalah jenis perangkat pengering yang sering digunakan di berbagai industri untuk mengeringkan bahan-bahan tertentu. Disebut "*tower*" karena umumnya memiliki struktur menara yang tinggi. *Tower dryer* terdiri dari lapisan-lapisan bundar yang dipasang secara berurutan ke atas pada suatu poros tengah yang berputar. Bahan yang akan dikeringkan dimasukkan dari bagian atas, sementara udara panas dialirkan atau diarahkan melalui struktur menara tersebut untuk mendistribusikan panasnya. Produk yang telah kering akan keluar pada bagian dasar menara (Imami, 2018). *Tower dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.

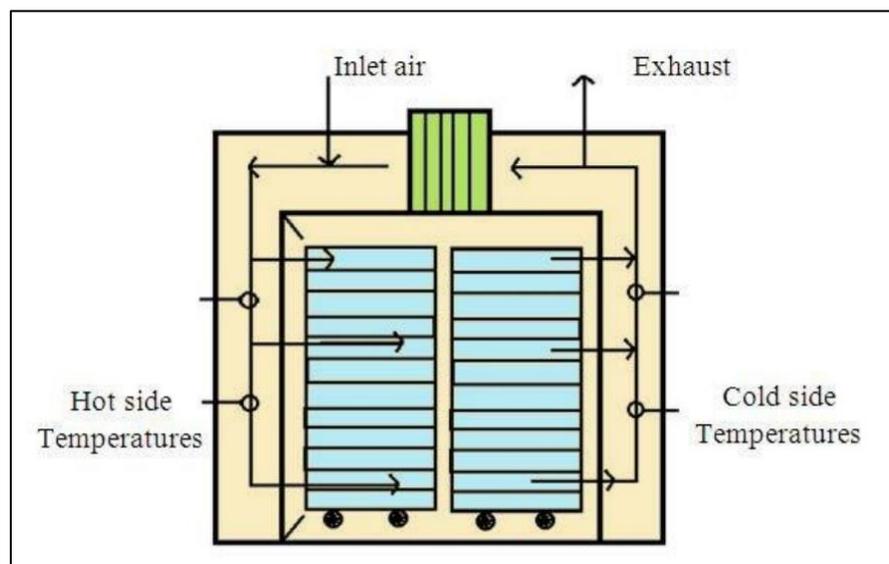


Gambar 2.5 Mesin pengering jenis *tower dryer*.

(Sumber: Imami, 2018)

2.3.6 Pengering Baki (*Tray Dryer*)

Tray dryer, juga dikenal sebagai *cabinet dryer*, adalah perangkat pengering berbentuk persegi yang dilengkapi dengan rak-rak di dalamnya untuk mengeringkan bahan, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Bahan dapat ditempatkan langsung di rak atau dalam wadah lain seperti baki atau nampan. Untuk mengatur sirkulasi udara *tray dryer*, selain menggunakan alat pemanas udara, umumnya terdapat kipas (*fan*). Udara yang telah dipacu oleh kipas memasuki unit pemanas di mana udara dipanaskan sebelum disalurkan di antara rak-rak yang memuat bahan (Wardhani, dkk., 2023). Arus udara panas dalam *tray dryer* dapat mengalir dari atas ke bawah atau sebaliknya, disesuaikan dengan karakteristik bahan yang dikeringkan.



Gambar 2.6 Pengering baki (*tray dryers*).

(Sumber: Rosyidi, dkk., 2022)

Tray dryer memberikan manfaat yang signifikan dalam produksi kecil karena pengoperasiannya yang mudah dan bahan yang dikeringkan dapat berinteraksi langsung dengan udara panas. Namun, penggunaan *tray dryer* membutuhkan tenaga kerja selama proses produksi dan memiliki biaya operasional yang cukup tinggi, sehingga umumnya digunakan untuk mengeringkan bahan-bahan bernilai tinggi. Perangkat

ini cocok untuk pengeringan bahan padat dan butiran, sering kali digunakan untuk jumlah produksi yang terbatas. Waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan (1-6 jam) bervariasi tergantung pada dimensi perangkat dan volume bahan yang dikeringkan (Rosyidi, dkk., 2022). Sumber panas yang digunakan dapat berasal dari *steam boiler* ataupun gas hasil pembakaran.

2.3.7 Tunnel Dryers (Pengering Terowongan)

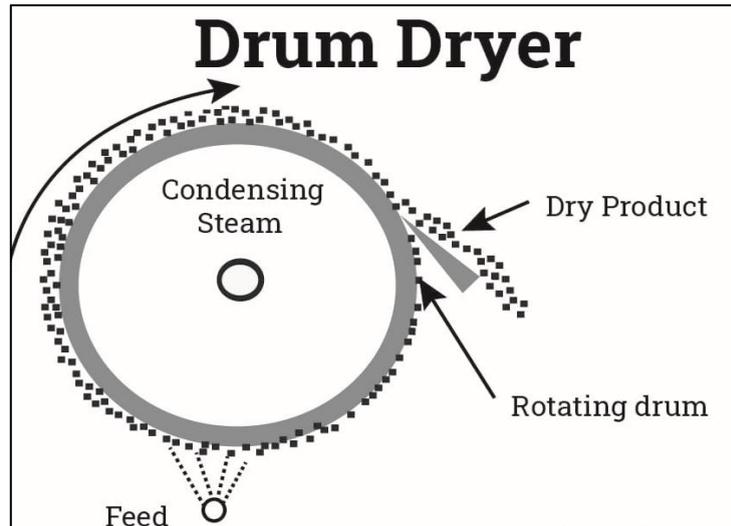
Pengering terowongan adalah perangkat yang digunakan untuk mengeringkan bahan dengan cara bahan tersebut dinaikkan secara perlahan-lahan di atas permukaan logam atau *belt* melalui kamar atau terowongan pengering yang dilengkapi dengan kipas dan pemanas. Dalam pengering terowongan, material yang akan dikeringkan ditempatkan dalam bak yang terpasang pada troli. Troli ini memasuki terowongan dan bergerak perlahan-lahan melaluinya, di mana aliran udara panas atau gas diarahkan ke dalam terowongan. Proses pengeringan terjadi saat material bergerak melalui terowongan tersebut.

Dibandingkan dengan pengering baki, pengering terowongan dianggap sebagai solusi yang lebih canggih. Proses ini memungkinkan material untuk dimasukkan dan dikeluarkan secara kontinu selama pengoperasiannya. Stabilitas material dijaga selama berada di atas troli yang melintasi terowongan, sehingga pengering ini sangat sesuai untuk produk yang sensitif terhadap kerusakan atau perubahan bentuk, seperti komponen otomotif, komponen elektronik, kaca, buah-buahan besar, sayuran, dan produk makanan berbagai jenis. Pengering terowongan menunjukkan efisiensi operasional yang tinggi terutama dalam pengolahan bahan yang memerlukan waktu pengeringan yang lebih lama (Abdissa, dkk., 2023).

2.3.8 Pengereng Drum

Penggunaan pengereng drum bertujuan untuk mengeringkan bahan dalam bentuk bubuk guna meningkatkan daya larut dan kemampuan penyerapan air pada produk tersebut. *Drum dryer* (lihat Gambar 2.7) terdiri dari satu atau beberapa silinder logam yang berputar secara horizontal, dipanaskan menggunakan uap air. Bahan umpan dalam lapisan tipis yang masih basah menempel pada permukaan silinder logam, dan dengan berputarnya silinder tersebut, produk yang telah kering dilepaskan menggunakan alat pengikis (Suharto, dkk., 2018). Prinsip kerja drum *dryer* melibatkan pengaliran cairan yang akan dikeringkan ke dalam silinder pengereng, di mana cairan tersebut menempel pada permukaan luar silinder yang dipanaskan untuk mengalami proses pengeringan. Melalui rotasi silinder yang dilengkapi dengan pisau pengikis di bagian atasnya, bahan yang menempel terkikis dan jatuh ke dalam wadah penampung, menghasilkan produk yang kering.

Pengereng drum digunakan secara luas untuk mengeringkan berbagai jenis larutan, suspensi, dan produk lainnya. Salah satu keunggulan utama dari pengereng drum adalah waktu pengeringannya yang relatif singkat, mencapai hanya beberapa detik. Hal ini menjadikan pengereng drum sebagai pilihan efektif untuk mengeringkan bahan yang peka terhadap panas. Pengereng drum juga memiliki keunggulan berupa ukurannya yang kompak, sehingga membutuhkan ruang yang lebih sedikit dibandingkan dengan pengereng semprot. Namun, ada beberapa kekurangan yang perlu dipertimbangkan, seperti biaya pemeliharaan yang tinggi dibandingkan dengan pengereng semprot. Dalam penggunaannya, diperlukan operator yang terampil untuk mengontrol berbagai parameter seperti laju umpan, ketebalan film, kecepatan rotasi, dan temperatur guna memastikan proses pengeringan berlangsung efisien (Renjini, dkk., 2022).



Gambar 2.7 Diagram mekanisme drum *dryer*.

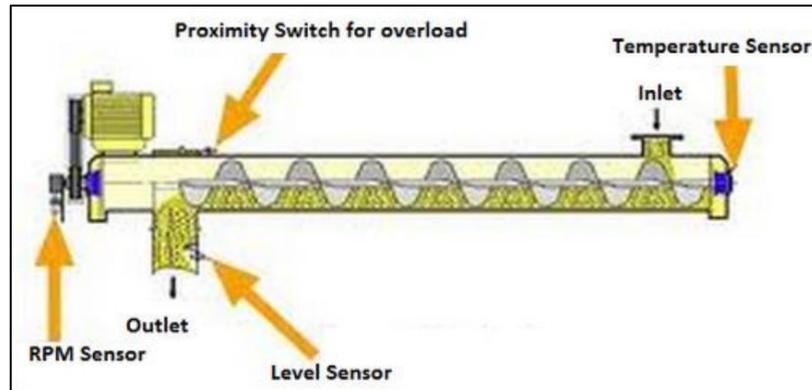
(Sumber: Renjini, dkk., 2022)

2.3.9 *Screw conveyor Dryer*

Screw conveyor dryer merupakan teknologi yang saat ini banyak diterapkan di berbagai sektor industri seperti pertanian, industri pangan, industri minuman, industri farmasi, industri kimia, industri pertambangan, industri perminyakan, dan konstruksi. Keandalan tinggi dari *screw conveyor dryer* membuatnya menjadi pilihan utama dalam berbagai industri, karena mampu mengeringkan dan mengalirkan produk secara berkesinambungan untuk berbagai jenis material. Dapat diandalkan untuk berbagai jenis produk, *screw conveyor dryer* dapat mengeringkan bahan mulai dari yang mudah mengalir seperti silika hingga yang sulit mengalir. Fleksibilitasnya juga memungkinkan penggunaan pada produk dengan berbagai karakteristik, termasuk bubuk halus, produk berkepadatan tinggi, produk dengan sifat lengket, hingga produk yang berserat (Imami, 2018).

Screw conveyor dryer adalah jenis alat pengering yang menggunakan *conveyor* sekrup (*screw conveyor*) sebagai bagian utamanya. *Screw conveyor* adalah suatu mekanisme yang menggunakan sekrup heliks atau pita spiral untuk memindahkan material dari satu tempat ke tempat

lain. Dalam konteks *screw conveyor dryer*, mekanisme ini digunakan untuk memindahkan bahan yang akan dikeringkan dari satu ujung perangkat ke ujung lainnya, sambil menghasilkan efek pengeringan. *Screw conveyor dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Mesin pengering jenis *screw conveyor dryer*.

(Sumber: Imami, 2018)

Jenis-jenis mesin pengering yang disebutkan di atas merujuk pada tipe-tipe yang umum digunakan dalam industri. Dalam konteks penelitian ini, dirancang sebuah mesin pengering untuk mendukung sistem torefaksi pada skala pilot. Fungsinya adalah untuk mengeringkan sampah daun sebelum dilakukan proses torefaksi, dengan tujuan untuk mengurangi kandungan air dalam sampah tersebut. Penurunan kandungan air ini diharapkan dapat mengurangi beban kerja reaktor torefaksi, serta mengoptimalkan kebutuhan energi dalam proses tersebut. Mesin pengering yang akan dirancang ini juga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan proses, dengan memanfaatkan gas buang atau gas sisa dari reaktor torefaksi untuk proses pengeringan.

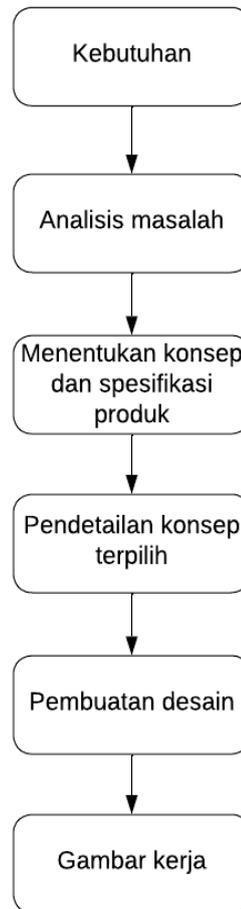
Dalam konteks mendukung proses torefaksi skala pilot, diperlukan mesin pengering yang mampu beroperasi secara kontinu untuk mengeringkan sampah secara berkelanjutan. Mesin pengering yang akan didesain memiliki kapasitas untuk mengolah 100 kg sampah per jam. Dari berbagai jenis mesin pengering yang telah dijelaskan, salah satu jenis mesin yang sesuai untuk

mengeringkan sampah daun sesuai dengan karakteristik sampah dari Universitas Lampung adalah *rotary dryer*. *Rotary dryer* memiliki kemiringan yang memungkinkan proses pengeringan yang berkesinambungan. *Rotary dryer* dapat digunakan untuk berbagai jenis material. Material masuk dari satu ujung *rotary dryer* dan keluar dari ujung lain yang lebih rendah. Pengoperasian *rotary dryer* dilakukan dengan memanaskan material secara langsung melalui kontak dengan gas panas. Selain itu, *rotary dryer* dilengkapi dengan *flights* yang berfungsi untuk mengaduk material sehingga pengeringan dapat dilakukan secara merata.

2.4 Prinsip-prinsip Desain Rekayasa

Desain rekayasa merupakan kegiatan yang bertujuan untuk mengatasi permasalahan yang belum terselesaikan atau menghadapi ulang permasalahan yang sudah dipecahkan sebelumnya dengan pendekatan yang baru. Proses ini melibatkan definisi dan penemuan berbagai solusi untuk menyelesaikan masalah yang dihadapi. Aspek-aspek yang terlibat dalam desain rekayasa mencakup kebutuhan pasar, spesifikasi dan konsep desain, proses manufaktur, serta strategi penjualan. Kemampuan intelektual memainkan peran krusial dalam implementasi pengetahuan ilmiah guna memastikan bahwa produk memenuhi standar desain dan memungkinkan proses manufaktur yang optimal (Hurst, 2005).

Secara umum, proses desain rekayasa dapat digambarkan sebagai proses pemecahan masalah yang sistematis yang dapat diterapkan pada berbagai jenis masalah, tidak terbatas hanya pada desain rekayasa. Pendekatan sistematis diperlukan dalam setiap tahapan desain untuk memastikan bahwa faktor-faktor yang relevan dipertimbangkan dengan baik (Hurst, 2005). Langkah-langkah dalam proses ini meliputi identifikasi masalah, generasi solusi-solusi potensial, pemilihan solusi terbaik, penyempurnaan konsep, pengembangan detail desain, dan formulasi deskripsi produk yang siap untuk proses manufaktur.



Gambar 2.9 Tahapan dalam desain rekayasa.

(Sumber: Nasution, dkk., 2022)

Rekayasa desain dimulai dengan penggalan inovasi dan kreativitas untuk menciptakan desain yang dapat memenuhi kebutuhan pasar sesuai dengan perkembangan teknologi saat ini. Langkah awalnya melibatkan identifikasi kebutuhan dan spesifikasi produk. Dalam mengembangkan konsepnya, desainer harus mampu mengevaluasi berbagai opsi untuk memilih alternatif terbaik. Proses ini kemudian diikuti dengan implementasi prosedur produksi sesuai dengan keputusan yang telah diambil (Nasution, dkk., 2022). Manajemen proses desain rekayasa memerlukan langkah-langkah yang terstruktur untuk memastikan hasil desain yang optimal dan terstruktur. Gambar 2.9 merupakan langkah-langkah yang direkomendasikan untuk manajemen proyek desain rekayasa.

2.5 Desain Dryer

Substansi dari penelitian ini adalah merancang sebuah alat pengering dengan sistem *rotary* berkapasitas 100 kg/jam menggunakan bantuan perangkat lunak Solidworks. Desain alat pengering ini ditujukan untuk sistem torefaksi sampah biomassa skala pilot di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Lampung. Sampah biomassa berupa daun akan dikeringkan di dalam *rotary dryer* dengan memanfaatkan gas sisa dari reaktor torefaksi untuk mencapai tingkat kandungan air yang diinginkan sebelum masuk ke dalam reaktor torefaksi. Energi panas yang diperlukan diperoleh dari pembakaran di dalam *burner*. Gas hasil pembakaran akan dihisap oleh *Induced Draft Fan* (IDF), mengalir melalui reaktor, dan kemudian dialirkan ke *rotary dryer*.

Pada desain *rotary dryer* yang direncanakan, proses pemanasan material yang akan dikeringkan dilakukan melalui kontak langsung dengan gas panas, yang dikenal sebagai *direct heating*. Gas panas akan mengalir berlawanan arah dengan aliran material padat (*counterflow*). Konfigurasi aliran berlawanan arah ini dipilih untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, sesuai dengan teori yang dijelaskan oleh Perry (1997). Umpan dimasukkan secara kontinyu dari satu ujung *rotary dryer*, sedangkan udara pemanas masuk dari ujung yang berlawanan. Di dalam silinder *rotary dryer*, terdapat *flights* yang terpasang pada dinding silinder dan berfungsi mengangkat serta menyebarkan umpan melalui udara panas, sehingga proses pengeringan dapat berlangsung secara merata.

Sebelum melakukan perancangan *dryer*, diperlukan serangkaian proses perhitungan dan perencanaan yang teliti. Desain *dryer* harus memenuhi berbagai persyaratan teknis, seperti kemampuan operasi secara kontinu, mekanisme kerja yang efisien, dimensi yang sesuai, pemilihan motor yang tepat, dan faktor-faktor lain yang relevan. Oleh karena itu, tahapan perhitungan dan perencanaan ini merupakan hal yang krusial sebelum

memulai pembuatan desain *dryer*. Penjelasan mengenai perhitungan *rotary dryer* akan diuraikan pada bagian selanjutnya.

2.5.1 Perhitungan Spesifikasi *Dryer*

Dalam perhitungan spesifikasi *dryer*, diperlukan berbagai persamaan yang sesuai dengan penggunaan *dryer* berbasis sistem *rotary*. Proses menentukan spesifikasi *dryer* melibatkan sejumlah perhitungan, diantaranya yaitu menentukan diameter *rotary dryer*, panjang *rotary dryer*, menghitung jumlah dan tinggi *flight*, serta menghitung *slope* (kemiringan) *rotary dryer*. Terdapat beberapa data awal yang diperlukan sebelum melakukan perhitungan *dryer*. Data-data dalam penelitian ini merujuk pada beberapa literatur seperti jurnal, *textbook*, internet dan lainnya. Penjelasan lebih lanjut mengenai perhitungan spesifikasi *dryer* adalah sebagai berikut:

a) Menghitung Diameter *Rotary dryer*

Diameter *rotary dryer* tergantung dari total luas aliran penampang (A_s) dan luas penampang drum (A_t). Perhitungan diameter *rotary dryer* dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2.1) berikut:

$$A_t = \frac{A_s}{S} = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots(2.1).$$

Di mana:

D = diameter, m

A_t = luas penampang drum, m²

A_s = total luas aliran penampang, m²

S = persentase luas penampang efektif yang ditempati padatan di dalam *dryer*, % (menurut Perry, 1997: nilai S memiliki nilai antara 10-15%)

Untuk menghitung diameter *rotary dryer*, diperlukan berapa nilai total luas aliran penampang (A_s) dan luas penampang silinder *dryer* (A_t). Untuk menghitung total luas aliran penampang *rotary dryer* (A_s), diperlukan laju aliran massa material yang akan dikeringkan,

densitas material yang akan dikeringkan dan persentase luas penampang efektif yang ditempati padatan di dalam *dryer*. Sehingga untuk menghitung A_s dapat menggunakan Persamaan (2.2) berikut:

$$A_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s v_s} \dots\dots\dots(2.2).$$

Di mana:

A_s = total luas aliran penampang, m^2

\dot{m}_s = laju aliran masa daun basah masuk, kg/s

ρ_s = densitas daun, kg/m^3

v_s = *solid average velocity*, m/s

Untuk mendapatkan nilai *solid average velocity* (v_s), dapat menggunakan Persamaan (2.3) berikut ini:

$$v_s = \frac{l}{60 t} \dots\dots\dots(2.3).$$

Di mana:

v_s = *solid average velocity*, m/s

l = panjang *dryer*, m

t = waktu tinggal di dalam *dryer*, menit

Kemudian untuk menghitung luas penampang drum (A_t) dapat menggunakan Persamaan (2.4) berikut:

$$A_t = \frac{A_s}{S} \dots\dots\dots(2.4).$$

Di mana:

A_t = luas penampang drum, m^2

A_s = total luas aliran penampang, m^2

S = persentase luas penampang efektif yang ditempati padatan di dalam *dryer*, %

b) Menghitung Jumlah dan Tinggi *Flight*

Jumlah *flight* dapat dihitung dengan menentukan range jumlah *flight* yang dipilih. Adapun range jumlah *flight* yaitu antara $2,4 \times D$ hingga $3 \times D$. Terdapat beberapa jenis *flight* yang dapat digunakan,

diantaranya yaitu *flight* radial, *flight* 90°, *flight* 45° dan lainnya (Gambar 2.9). *Flight* yang digunakan tentunya disesuaikan dengan kebutuhan dan dapat berdasarkan karakteristik penanganan material yang akan dikeringkan (Perry, 1997). Untuk menghitung jumlah *flight* dapat kita ketahui dengan menggunakan Persamaan (2.5) berikut (Perry, 1997):

$$\text{Jumlah flight} = X \times D \dots\dots\dots(2.5).$$

Di mana :

X = range yang ditentukan (2,4 – 3)

D = diameter silinder *rotary dryer*, m

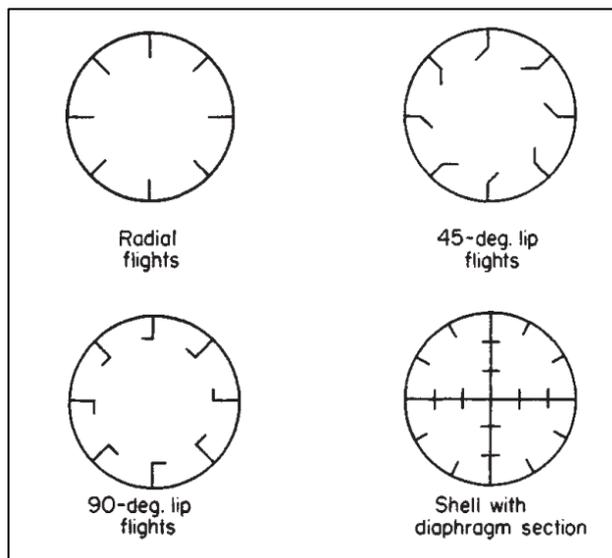
Sedangkan tinggi *flight rotary dryer* dapat dihitung dengan menggunakan rasio 1/10 diameter *rotary dryer*. Sehingga dapat menggunakan Persamaan (2.6) berikut:

$$\text{Tinggi Flight} = \frac{1}{10} D \dots\dots\dots(2.6).$$

Di mana:

1/10 = rasio perbandingan terhadap diameter

D = diameter silinder *rotary dryer*, m



Gambar 2.9 Alternatif pengaturan *flight rotary dryer*.
(Sumber: Perry, 1997)

c) **Slope dan Derajat Kemiringan Rotary dryer**

Slope rotary dryer atau kemiringan *rotary dryer* bervariasi mulai dari 0 hingga 8 m/m (Perry, 1997). Untuk menghitung *slope rotary dryer* dapat digunakan Persamaan (2.7) berikut ini (Perry, 1997):

$$S_l = \frac{0,19 l}{N D t} \dots\dots\dots(2.7).$$

S_l = *slope rotary dryer*, m/m

t = waktu tinggal di dalam *dryer*, menit

l = panjang *dryer*, m

N = putaran *dryer*, rpm

D = diameter *dryer*, m

Kemudian dari nilai *slope* yang didapat, digunakan untuk menentukan kemiringan dari *rotary dryer*. Adapun kemiringan *rotary dryer* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.8) berikut ini:

$$\alpha = \arctan(S_l) \dots\dots\dots(2.8).$$

Di mana:

α = sudut kemiringan, °

S_l = *slope rotary dryer*, m/m

d) **Daya Motor Penggerak Rotary dryer**

Untuk menghitung daya motor yang diperlukan, perlu diketahui jumlah torsi pada *rotary dryer*. Untuk menghitung torsi yang terjadi pada *rotary dryer* dapat menggunakan Persamaan (2.9) berikut (Susanto, 2021):

$$T = \frac{m_i g D}{2000} \dots\dots\dots(2.9).$$

Di mana:

T = torsi *rotary dryer*, kN.m

m_i = massa drum dan daun, kg

g = percepatan gravitasi, m/s²

D = diameter silinder *rotary dryer*, m

Kemudian menghitung jumlah daya yang diperlukan pada *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.10) berikut (Susanto, 2021):

$$P = \frac{2 \pi n T}{60} \dots\dots\dots(2.10).$$

Di mana:

P = daya *rotary dryer*, kW

n = kecepatan putar *rotary dryer*, rpm

T = torsi *rotary dryer*, kN.m

Kemudian menghitung jumlah daya motor yang diperlukan pada *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.11) berikut (Susanto, 2021):

$$P_m = \frac{P}{0,85} \dots\dots\dots(2.11).$$

Di mana:

P = daya *rotary dryer*, kW

P_m = daya motor yang diperlukan, kW

2.5.2 Perhitungan Kebutuhan Energi

Dryer didesain untuk menurunkan kandungan air dari sampah daun. Sampah daun yang akan dikeringkan memiliki kandungan air yang tinggi yaitu sebesar 40%. Oleh karena itu diperlu diperlukan energi yang cukup untuk mengeringkan sampah daun hingga dihasilkan output sampah daun dengan kandungan air yang diinginkan. Semakin tinggi kandungan air yang terdapat pada material yang akan dikeringkan, akan mengakibatkan semakin besar energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan material tersebut.

Temperatur gas yang masuk kedalam *rotary dryer* adalah 100°C, namun temperatur gas sisa yang keluar dari reaktor yaitu 200°C. Oleh karena itu perlu udara tambahan yang harus disuplai untuk menurunkan temperatur 200°C menjadi 100°C. Untuk menghitung laju gas tambahan untuk menurunkan temperatur gas yang berasal dari reaktor menggunakan Persamaan (2.12).

$$((\dot{m}_{gh} + \dot{m}_{gc})h_{g.in}) = (\dot{m}_{gh} h_{gh}) + (\dot{m}_{gc} h_{gc}) \dots\dots(2.12).$$

Di mana:

$h_{g.in}$ = enthalpy gas yang masuk ke dalam *rotary dryer*, kJ/kg

h_{gh} = enthalpy gas panas dari reaktor, kJ/kg

h_{gc} = enthalpy udara tambahan, kJ/kg

\dot{m}_{gh} = laju aliran gas panas dari reaktor, kg/s

\dot{m}_{gc} = laju aliran udara tambahan, kg/s

Dengan adanya udara tambahan yang masuk ke dalam *rotary dryer*, maka laju aliran gas yang masuk ke dalam *rotary dryer* akan menjadi lebih besar. Untuk menghitung laju gas campuran yang masuk ke dalam *rotary dryer* untuk proses pengeringan sampah daun menggunakan Persamaan (2.13).

$$\dot{m}_{g.in} = \dot{m}_{gh} + \dot{m}_{gc} \dots\dots\dots(2.13).$$

Di mana:

\dot{m}_{gh} = laju aliran gas panas dari reaktor, kg/s

\dot{m}_{gc} = laju aliran udara tambahan, kg/s

$\dot{m}_{g.in}$ = laju aliran gas yang masuk ke dalam *rotary dryer*, kg/s

Untuk menghitung kapasitas *fan* yang dibutuhkan untuk menghisap gas panas, dapat menggunakan Persamaan (2.14) berikut:

$$Q = \frac{\dot{m}_{g.in}}{\rho} \dots\dots\dots(2.14).$$

Di mana:

Q = kapasitas *fan*, m³/s

$\dot{m}_{g.in}$ = laju aliran gas yang masuk ke dalam *rotary dryer*, kg/s

ρ = densitas gas panas, kg/m³

Adapun untuk mengetahui massa air yang dihilangkan dari material (\dot{m}_w) dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2.15) berikut (Nursani, dkk., 2021):

$$\dot{m}_w = \dot{m}_s - \left(\frac{100 - Mc_w}{100 - Mc_p} m_s \right) \dots\dots\dots(2.15).$$

Di mana:

\dot{m}_w = laju massa air yang dihilangkan, kg/s

\dot{m}_s = laju aliran massa material, kg/s

Mc_w = kandungan air material sebelum dikeringkan, %

Mc_p = kandungan air material setelah pengeringan, %

Temperatur sampah daun yang akan dikeringkan berada pada temperatur lingkungan. Pada saat proses pengeringan, temperatur sampah daun akan meningkat. Oleh karena itu, untuk mengetahui besarnya energi dalam proses pemanasan Q_{ph} , yaitu energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur material dari temperatur ruangan yaitu 30°C hingga mencapai temperatur pengeringan yang diinginkan menggunakan Persamaan (2.16) berikut (Basu, 2021):

$$Q_{ph} = \dot{m}_s C_{pw} (T_1 - T_0) \dots\dots\dots(2.16).$$

Di mana:

Q_{ph} = energi yang dibutuhkan untuk pemanasan, kW

\dot{m}_s = laju aliran massa material, kg/s

C_{pw} = panas spesifik material, kJ/kg.°C

T_1 = temperatur pengeringan, °C

T_0 = temperatur material masuk, °C

Proses pengeringan bertujuan untuk mengurangi kandungan air pada material. Pada proses pengeringan, kandungan air yang terdapat pada material yang dikeringkan akan menguap. Oleh karena itu untuk mengetahui besarnya energi yang dibutuhkan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat pada material dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.17) berikut (Basu, 2021):

$$Q_{dry} = \dot{m}_w L \dots\dots\dots(2.17).$$

Di mana:

Q_{dry} = energi untuk penguapan, kW

\dot{m}_w = laju massa air yang dihilangkan, kg/s

L = panas laten penguapan, kJ/kg

Energi total yang diperlukan selama proses pengeringan material pada *rotary dryer* merupakan jumlah dari seluruh kebutuhan energi material. Sehingga untuk menghitung energi total dapat menggunakan Persamaan (2.18) berikut ini:

$$Q_d = Q_{ph} + Q_{dry} \dots\dots\dots(2.18).$$

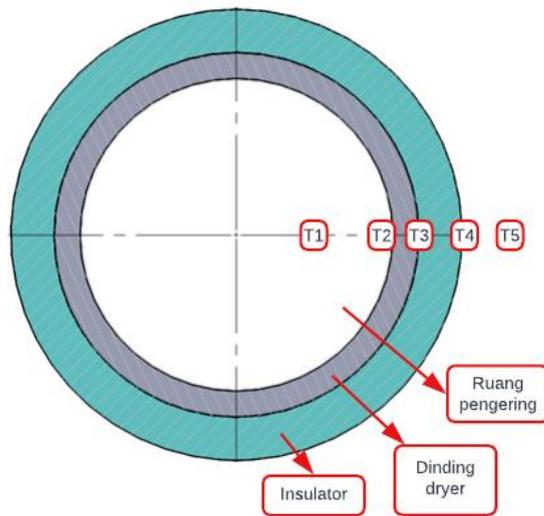
Di mana:

Q_d = energi total yang dibutuhkan selama proses pengeringan, kW

Q_{ph} = energi yang dibutuhkan untuk pemanasan, kW

Q_{dry} = energi untuk penguapan, kW

2.5.3 Perpindahan Panas dan Kehilangan Panas



Gambar 2.10 Skema lapisan dinding dan distribusi temperatur pada *dryer*.

(Sumber: Kurniawansah, 2022)

Di mana:

T1 = Temperatur dalam *dryer*

T2 = Temperatur dinding dalam *dryer*

T3 = temperatur dinding luar *dryer*

T4 = temperatur dinding insulator luar

T5 = Temperatur lingkungan

Perpindahan panas yang terjadi pada *dryer* merupakan hal yang sangat penting. Perpindahan panas berpengaruh terhadap seberapa efisiensi *rotary dryer* tersebut. Pada saat *rotary dryer* bekerja tentu saja terdapat panas yang hilang. Panas yang hilang ini disebut juga dengan Q_{loss} . Kehilangan panas pada *dryer* dapat disebabkan adanya perpindahan panas dari dalam *dryer* menuju udara luar *dryer* melalui dinding *dryer*. Semakin besar kehilangan panas yang terjadi pada *dryer*, maka semakin besar juga rugi yang dihasilkan. Untuk itu pentingnya untuk mengetahui jumlah kehilangan panas yang terjadi. Gambar 2.10 merupakan skema temperatur pada setiap lapisan dinding *rotary dryer*. Analisis *heat loss* dan perpindahan panas lebih lengkapnya sebagai berikut:

a. Analisis Heat Loss

Heat loss pada *rotary dryer* perlu diketahui karena memiliki peran yang penting dalam mempengaruhi efisiensi energi. Kehilangan panas yang tidak terkontrol dapat mengurangi efisiensi energi pada *rotary dryer*. Untuk mengetahui *heat loss*, perlu mengetahui berapa luas permukaan silinder bagian terdalam dan terluar pada *rotary dryer* dan hambatan termal yang terdapat pada *rotary dryer*. Untuk menghitung besarnya luas permukaan pada silinder *rotary dryer* dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2.19) berikut:

$$A = 2\pi rl \dots\dots\dots(2.19).$$

Di mana:

A = luas permukaan silinder, m²

r = jari-jari silinder, m

l = panjang silinder, m

Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan resistansi termal yang terdapat pada lapisan dinding *rotary dryer*. Resistansi

termal merupakan kemampuan suatu benda untuk menangkis aliran panas. Semakin besar resistansi yang terjadi maka semakin sulit juga perpindahan energi panas yang terjadi. Resistansi termal yang terjadi pada *rotary dryer* merupakan resistansi konveksi dan konduksi. Untuk menghitung resistansi konveksi dapat menggunakan Persamaan (2.20) berikut:

$$R_i = \frac{1}{hA} \dots \dots \dots (2.20).$$

Di mana:

R = resistansi, °C/W

h = koefisien perpindahan panas konveksi, W/m².°C

A = luas permukaan, m²

Sedangkan untuk resistansi konduksi yang terjadi pada *rotary dryer* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.21) berikut ini:

$$R = \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi kl} \dots \dots \dots (2.21).$$

Di mana:

R = resistansi, °C/W

r = jari-jari silinder, m

k = konduktivitas termal, W/m.°C

l = panjang silinder, m²

Kemudian setelah semua resistansi termal yang terdapat pada *rotary dryer* didapatkan, maka dapat dihitung nilai resistansi total (R_{total}) pada *rotary dryer*. Resistansi total merupakan jumlah seluruh resistansi yang terdapat pada *rotary dryer*. Untuk menghitung nilai resistansi total dapat menggunakan Persamaan (2.22) sebagai berikut:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \dots \dots \dots (2.22).$$

Untuk menghitung besarnya kehilangan panas yang terjadi pada *rotary dryer* (Q_{loss}) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.23) sebagai berikut:

$$Q_{loss} = \frac{T_i - T_o}{R_{total}} \dots \dots \dots (2.23).$$

Di mana:

Q_{loss} = kehilangan energi panas, W

T_i = temperatur di dalam silinder, °C

T_o = temperatur di luar silinder, °C

R_{total} = resistansi total, °C/W

b. Analisis Perpindahan Panas

Kalor adalah bentuk energi panas atau jumlah panas yang terkandung dalam sebuah benda. Perpindahan panas atau kalor dapat terjadi dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang memiliki suhu lebih rendah. Terdapat tiga macam mekanisme perpindahan panas yang umum terjadi, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

1. Konduksi

Konduksi yaitu merupakan perpindahan panas melalui zat padat namun tidak disertai dengan perpindahan massa partikel-partikelnya. Proses ini terjadi dalam benda padat, di mana partikel energi termal mengalir dari satu titik ke titik lainnya tanpa adanya perpindahan massa zat. Persamaan (2.24) berikut ini merupakan persamaan perpindahan panas konduksi yang terjadi pada silinder.

$$\dot{Q}_{cond} = 2 \pi k l \frac{\Delta T}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \dots \dots \dots (2.24).$$

Di mana,

\dot{Q}_{cond} = perpindahan panas konduksi pada silinder, W

ΔT = beda temperatur, °C

r = jari –jari silinder, m

k = konduktivitas termal, W/m.°C

l = panjang silinder, m²

2. Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas melalui aliran zat perantara yang juga ikut bergerak. Proses konveksi umumnya terjadi pada zat cair dan gas, seperti udara atau angin. Konveksi alami muncul karena adanya perbedaan kepadatan fluida yang disebabkan oleh perbedaan temperatur, sedangkan konveksi paksa melibatkan penggunaan kipas untuk memaksa pergerakan fluida.

3. Radiasi

Perpindahan panas melalui radiasi adalah proses di mana panas dipindahkan melalui pancaran gelombang elektromagnetik dan tidak memerlukan adanya media sebagai perantara. Perpindahan panas melalui radiasi ini melibatkan pancaran elektromagnetik dengan panjang gelombang tertentu.

Pada *dryer* perpindahan energi panas merupakan hal yang penting untuk diperhitungkan. Perpindahan panas pada *dryer* akan menentukan besarnya energi panas yang keluar dari dalam *dryer* sehingga mempengaruhi besarnya konsumsi energi pada *dryer*. Panas yang dialirkan ke dalam *dryer* harus dapat diserap dengan merata oleh material yang akan dikeringkan. Panas dari dalam *dryer* dapat keluar melalui dinding *dryer*, sehingga dinding *dryer* sebisa mungkin tidak menyerap panas. Hal ini juga menentukan jenis material yang harus digunakan untuk merancang *dryer*.

2.5.4 Perhitungan Energi Sistem

Untuk mengetahui keseimbangan energi pada *rotary dryer*, maka perlu menghitung besar energi yang masuk dan besar energi yang keluar selama proses pengeringan. Adapun untuk menghitung energi masuk, energi keluar, dan energi sistem selengkapnya sebagai berikut:

a. Energi Input (Q_{in})

Energi input merupakan jumlah energi yang masuk selama proses pengeringan pada *rotary dryer*. Energi input terdiri dari energi dari gas yang disuplai, energi pada daun, dan daya motor yang digunakan. Untuk menghitung energi gas panas yang masuk ke dalam *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.25).

$$Q_{g.in} = \dot{m}_{g.in} h_{udara@100^{\circ}C} \dots \dots \dots (2.25).$$

Di mana:

$Q_{g.in}$ = Energi gas panas masuk, kW

$\dot{m}_{g.in}$ = massa gas panas masuk, kg/s

$h_{udara@100^{\circ}C}$ = enthalpy udara 100°C, kJ/kg

Menghitung energi daun masuk *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.26).

$$Q_{s.in} = \dot{m}_s CV_s \dots \dots \dots (2.26).$$

Di mana:

$Q_{s.in}$ = energi material masuk, kW

CV_s = kapasitas panas material masuk, kJ/kg

b. Energi output (Q_{out})

Menghitung energi gas panas yang keluar dari *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.27).

$$Q_{g.out} = \dot{m}_{g.out} h_{udara@80^{\circ}C} \dots \dots \dots (2.27).$$

Di mana:

$Q_{g.out}$ = energi gas panas keluar, kW

$\dot{m}_{g.out}$ = massa gas panas keluar, kg/s

$h_{udara@80^{\circ}C}$ = enthalpy udara 80°C, kJ/kg

Menghitung energi daun keluar *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.28).

$$Q_{s.out} = \dot{m}_{s.out} \cdot CV_d \dots \dots \dots (2.28).$$

Di mana:

$Q_{s.out}$ = energi material keluar, kW

CV_d = kapasitas panas material keluar, kJ/kg

c. Energi sistem (Q_{sisa})

Menghitung energi sistem dari proses pengeringan pada *rotary dryer* menggunakan Persamaan (2.29).

$$Q_{sistem} = Q_{in} - Q_{out} \dots\dots\dots(2.29).$$

Di mana:

Q_{sistem} = Energi sistem, kW

Q_{in} = energi masuk, kW

Q_{out} = energi keluar, kW

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Adapun untuk tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1.1 Studi Literatur

Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Adapun beberapa literatur yang dipelajari yaitu mempelajari mengenai jenis-jenis teknologi pengeringan saat ini, mempelajari kelebihan dan kekurangan pada *dryer* tersebut, serta cara kerja pada *dryer*. Kemudian mempelajari karakteristik sampah yang ada, mempelajari perpindahan panas yang terjadi pada *dryer*, dan mempelajari perencanaan dan perhitungan yang dibutuhkan untuk mendesain *dryer*.

3.1.2 Pemilihan Konsep

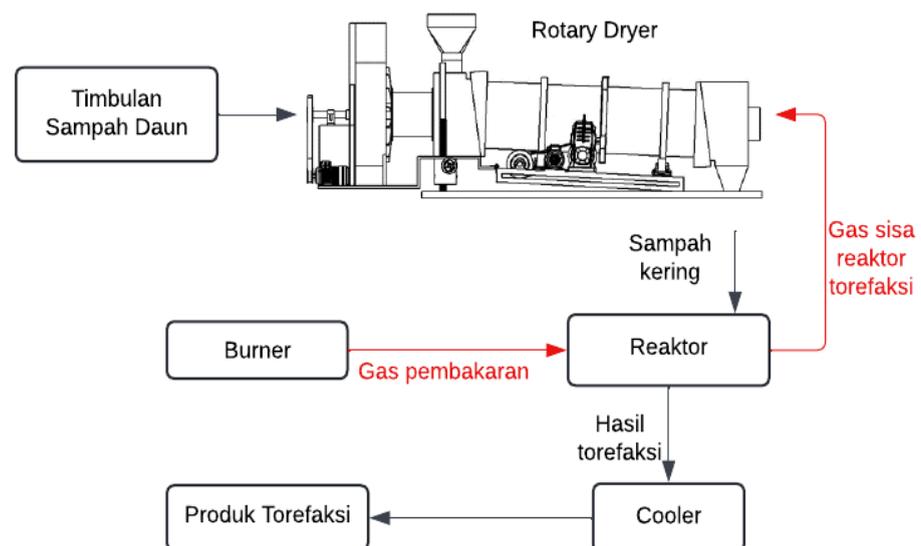
Tahap berikutnya adalah proses pemilihan konsep untuk pengembangan *dryer* yang akan didesain. Proses ini melibatkan evaluasi aspek-aspek fungsionalitas, prinsip kerja yang sesuai dengan kondisi yang ada, serta mempertimbangkan masalah-masalah krusial yang relevan. Konsep *dryer* yang direncanakan adalah untuk pengeringan sampah daun, yang memerlukan kemampuan operasi kontinu dan distribusi panas yang merata dalam proses pengeringannya. Desain *dryer* ini mengusung pendekatan pemanfaatan sumber panas dari gas hasil pembakaran *burner*, di mana gas panas secara langsung berinteraksi dengan material sampah yang akan dikeringkan (*direct heating*). Setelah menganalisis berbagai konsep yang tersedia, diputuskan untuk memilih *dryer* tipe *rotary* sebagai solusi untuk menangani permasalahan yang dihadapi dalam penelitian ini.

3.1.3 Perhitungan *Rotary dryer*

Selanjutnya dilakukan perhitungan yang sesuai dengan jenis *dryer* yang telah ditentukan. Sebelum itu, data-data dan asumsi diambil dari literatur yang akan menjadi acuan dalam perhitungan yang dilakukan. Adapun perhitungan *rotary dryer* yang dilakukan yaitu perhitungan spesifikasi *rotary dryer* untuk mendapatkan spesifikasi dan dimensi *rotary dryer*, perhitungan kebutuhan energi pada *rotary dryer*, dan perhitungan perpindahan panas serta kehilangan energi panas yang terjadi pada *dryer*. Proses perhitungan *dryer* dilakukan menggunakan bantuan program *software* Microsoft Excel.

3.1.4 Pembuatan Gambar Desain

Langkah selanjutnya yaitu proses pembuatan gambar desain 3D. Pembuatan desain mengacu pada konsep, data-data, analisis, dan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Pembuatan desain pada penelitian ini menggunakan bantuan dari *software* Solidworks. Adapun skema keseluruhan dari proses torefaksi skala pilot yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



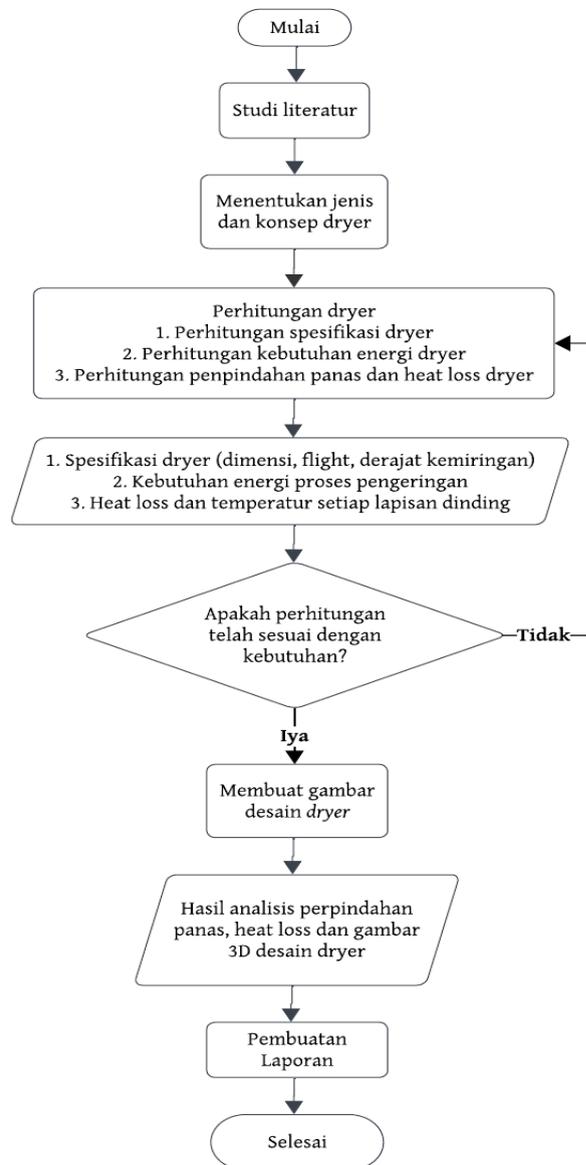
Gambar 3.1 Skema proses torefaksi skala pilot.

3.1.5 Kesimpulan

Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian dan dituangkan dalam bentuk laporan skripsi.

3.2 Alur Tahap Pelaksanaan

Adapun alur tahapan pelaksanaan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2 Diagram alur penelitian.

3.3 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan sebagai pendukung penelitian ini adalah program *software* Solidworks yang digunakan untuk media pembuatan gambar desain *dryer*, media untuk perhitungan yang dilakukan menggunakan program Microsoft Excel, dan untuk penyusunan laporan menggunakan Microsoft Word.

V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat pada penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan spesifikasi *rotary dryer* yang di desain adalah sebagai berikut:

- Kapasitas : 100 kg/jam
- Diameter silinder : 0,9874 m
- Diameter luar dinding : 1,016 m
- Diameter luar insulator : 1,116 m
- Panjang silinder : 3,5 m
- Jumlah *flight* : 3 buah
- Tinggi *flight* : 0,1 m
- *Slope* : 0,022 m/m
- Derajat kemiringan : 1,28°
- Daya motor : 2 HP
- Kecepatan putar : 1 rpm
- Waktu tinggal : 30 menit

2. Energi yang dibutuhkan *rotary dryer* dalam melakukan proses pengeringan sampah daun adalah 25,32 kW, di mana 4,4 kW energi untuk meningkatkan temperatur daun dari 30°C hingga temperatur pengeringan 100°C dan 20,926 kW energi untuk menguapkan kandungan air pada sampah daun.

3. Besarnya kehilangan panas (*heat loss*) yang terjadi pada *rotary dryer* adalah sebesar 0,304 kW. Temperatur pada setiap lapisan dinding *rotary*

dryer yaitu pada dinding dalam silinder sebesar 100°C , pada dinding luar sebesar $99,99^{\circ}\text{C}$, dan temperatur pada lapisan luar insulator mencapai $34,96^{\circ}\text{C}$.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Desain *rotary dryer* pada penelitian ini diharapkan dapat dilanjutkan dengan direalisasikan dengan tahapan manufaktur dalam bentuk alat yang sebenarnya.
2. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan dengan melakukan proses simulasi sehingga mendapatkan hasil yang lebih nyata dibandingkan dari perhitungan secara teoritis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdissa, Z.K., Tola, Y.B., Taye, A.H., Mohammed, H.H. 2023. *Harmonizing Drying Time, Layer Thickness, and Drier Zones for Drying Kinetics: Quality and Safety of Solar Tunnel-Dried Wet-Processed Parchment Coffee (Coffea arabica L.)*. International Journal of Food Science Vol 2023, No -: 1-16.
- Alwan, H., Jayanudin., Fajrianto, N.A., and Septiaziz, A.S. 2021. *Pengaruh Temperatur Udara Pengering Dan Konsentrasi Maltodekstrin Terhadap Laju Deposisi Partikel di Dinding Ruang Spray Dryer Skala Pilot*. Jurnal Integrasi Proses Vol. 10, No. 2: 82 – 89.
- Amrul., Triyadi, D., and Gandidi, I.M. 2019. *Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus*. Jurnal Mechanical, Vol 10, No 1: 19-22.
- Anungputri, P.S., Yuliandari, P., and Suroso, E. 2019. *Karakterisasi Sampah di Lingkungan Universitas Lampung*. Journal of Tropical Upland Resources Vol. 01, No. 01: 171-176.
- Barus, S.B., and Nasution, A.H. 2022. *Analisa Alat Pengering Biji Kopi Menggunakan Udara Panas Variasi 3 Lubang*. PISTON Vol 6, No. 2: 48-56.
- Basu, Prabir. 2013. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction practical design and theory*. Elsevier Inc.
- Cengel, Yunus A. 2006. *heat and mass transfer: a practical approach 3rd Edition*. McGraw-Hill.
- Hardiyani, S.E., Setiawan, A., Cahyono, L. 2022. *Analisis Karakteristik, Komposisi dan Timbulan Sampah Non-B3 di TPS Tanjung Tembaga Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya*. Conference Proceeding on Waste Treatment Technology, Vol.5, No.1, Hal. 152-157.
- Hurst, Kenneth S. 2005. *The Engineering Design Principles*. University of Hull.

- Imami, Y. N. A. 2018. *Desain Dan Pembuatan Alat Pengering Bibit Kacang Panjang Tipe Tray Dryer Yang Ergonomis Dengan Mobilitas Tinggi*. (Tugas Akhir). Fakultas Teknologi Industri. Universitas Islam Indonesia.
- Kurniawansah, Zulkri. 2022. *Analisis Heat Balance Pada Reaktor Torefaksi Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket*. (Skripsi). Fakultas Teknik. Universitas Lampung.
- Lawanangkul, Chatchawan. 2013. *Municipal Solid Waste Dryer by Using Waste Heat Design*. (Degree Conferral). Faculty of the Graduate School of Asia Pacific Studies. Ritsumeikan Asia Pacific University.
- Nasution, Zuanda Maulana, Sari, Delima Yanti, Nabawi, Rahmat Azis, Rifelino. 2022. *Jurnal Review: Metode Perancangan Produk Dalam Teknik Mesin Design Methods of Product in Mechanical Engineering: A Review*. Jurnal VOMEK Vol.4, No.3: 20-29.
- Nugroho, Faisal Ardi. 2018. *Rancang Bangun dan Pengujian Rotary dryer IDF (Induced Draft Fan) Variasi Mass Flow Rate dan Waktu Pengeringan*. Skripsi thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nursani, Daragantina, Hafitara, Harry, Bagawanta, Bariq, Surjosatyo, Adi. 2021. *Investigation of rotary dryer performance fueled with wood pellets for biomass*. Department of Mechanical Engineering. University of Indonesia.
- Perry, Robert H. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Renjini, A.S., Chandran, S.M.P., Prasobh, G.R., Akhila, J.B., Rejakumar, P., Sahishna, S.S. 2022. *An Overview on Drying*. IJPPR Human Vol. 23, No. 4: 93-108.
- Rosyidi, M., and Fahrudin, A. 2022. *Rancang Bangun Cabinet Dryer Dengan Variasi Kecepatan Blower Menggunakan Pembakaran Arang Pada Tanaman Cabai*. Procedia of Engineering and Life Science Vol. 3: 1-10.
- Sabarez, Henry. 2016. *Drying of Food Materials*. CSIRO Food and Nutrition. Sydney. Australia.
- Shakidi, Siti Suaidah. 2017. *Computational Investigation of Fluidized Drying of Paddy by Air with a State Variable of Time*. (Disertasi). Universiti Teknologi PETRONAS. Malaysia.

- Suharto, I., dan Taufik, Y. 2018. *Alat dan Mesin dalam Sistem Rantai Pangan*. Unpar Press. Bandung.
- Susanto, H., Setyobudi, R.H., Sugiyanto, D., Chan, Y., Yandri, E., Wahono, S.K., Abdullah, K., Burlakovs, J., Widodo, W., Nugroho, Y.A., Yaro, A. 2021. *Design of Rotary dryer for Sand Drying using Biomass Energy Sources*. E3S Web of Conferences 226.
- Triadi M.R., Yerizam, M., and Yulianti, S. 2021. *Rancang Bangun Alat Dryer Untuk Pengeringan Pulp Berbasis Campuran Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Pelepah Pisang*. Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI) Vol. 1, No. 12: 503-510.
- Wardhani, M.T., Fadilah, S.N., Prastika, A., Arimbawa, I.M., Khamil, A.I., Darmayanti, R.F., Muharja, M.M. 2023. *Pengaruh Perendaman, Waktu dan Ketebalan Pada Pengeringan Jahe Putih (Zingiber Officinale Var. Amarum) Menggunakan Tray Dryer dan Solar Dryer*. Jurnal Teknologi Separasi, Vol. 9, No.1: 1-10.
- Yuliandari, P., Suroso, E., and Anungputri, P.S. 2019. *Studi Timbulan Dan Komposisi Sampah Di Kampus Universitas Lampung*. Journal of Tropical Upland Resources Vol. 01, No. 01: 121-128.