

**PERANCANGAN SISTEM TOREFAKSI KONTINU SKALA PILOT  
KAPASITAS 100 KG/JAM UNTUK SAMPAH ORGANIK DI  
LINGKUNGAN UNIVERSITAS LAMPUNG (UNILA)**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Pico Tamara Berlia**

**2015021052**



**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2024**

**PERANCANGAN SISTEM TOREFAKSI KONTINU SKALA PILOT  
KAPASITAS 100 KG/JAM UNTUK SAMPAH ORGANIK DI  
LINGKUNGAN UNIVERSITAS LAMPUNG (UNILA)**

**Oleh  
Pico Tamara Berlia  
2015021052**

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 SISTEM TOREFAKSI KONTINU SKALA PILOT KAPASITAS 100 KG/ JAM UNTUK SAMPAH ORGANIK DI LINGKUNGAN UNIVERSITAS LAMPUNG (UNILA)

Oleh

Pico Tamara Berlia

Energi masih banyak bergantung pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan, sehingga pengembangan energi terbarukan sangat diperlukan. Salah satu solusinya adalah pemanfaatan sampah organik melalui proses torefaksi. Universitas Lampung menghasilkan sekitar  $\pm 770$  kg sampah per hari yang berpotensi diubah menjadi bahan bakar. Torefaksi adalah proses pemanasan biomassa pada suhu 200-300°C tanpa udara yang dapat mengurangi sampah dan menghasilkan energi. Reaktor torefaksi yang ada saat ini hanya berkapasitas 5 kg/jam dan terbatas pada skala laboratorium. Penelitian ini bertujuan merancang reaktor torefaksi kontinu skala pilot. Metode yang digunakan adalah menghitung dimensi, menganalisis perpindahan panas, memodelkan desain 3D, serta melakukan analisis keseimbangan panas.

Penelitian ini menghasilkan desain dimensi reaktor, pengering (*dryer*), dan pendingin arang (*cooling char*). Energi yang masuk tercatat sebesar 564,87 kW (100%), dengan energi keluar 409,3 kW (72,46%) dan kehilangan panas (*heat loss*) sebesar 155,57 kW (27,54%). Setiap komponen dalam sistem torefaksi memiliki kebutuhan energi termal yang berbeda. *Rotary dryer* memerlukan 25,32 kW untuk pengeringan, *reactor rotary drum* membutuhkan 10,23 kW untuk proses torefaksi, dan *cooling char* memerlukan 60,77 kW untuk pendinginan. Energi sistem yang diperoleh adalah 102,24 kW untuk reaktor, 152,196 kW untuk *dryer*, dan 60,987 kW untuk *cooling char*.

Kesimpulannya, sistem torefaksi skala pilot ini menghasilkan desain alat dengan kapasitas 100 kg/jam, yang dapat mengoptimalkan pemanfaatan sampah organik sebagai bahan bakar efisien dan ramah lingkungan.

Kata kunci : *Energi Terbarukan* , *Torefaksi*, *Sampah*, *Keseimbangan Energi*, *Perancangan*.

**ABSTRACT****DESIGN OF A PILOT SCALE CONTINUOUS TORREFACTION SYSTEM  
OF 100 KG/HOUR CAPACITY FOR ORGANIC WASTE IN THE  
ENVIRONMENT OF LAMPUNG UNIVERSITY (UNILA)***By*

Pico Tamara Berlia

Energy is still largely dependent on non-renewable fossil fuels, so the development of renewable energy is needed. One solution is the utilization of organic waste through the torefaction process. Lampung University produces around  $\pm 770$  kg of waste per day that has the potential to be converted into fuel. Torefaction is a process of heating biomass at 200-300°C without air that can reduce waste and produce energy. The current torefaction reactor only has a capacity of 5 kg/hour and is limited to laboratory scale. This research aims to design a pilot-scale continuous torefaction reactor. The methods used are calculating dimensions, analyzing heat transfer, modeling 3D designs, and conducting heat balance analysis.

This research resulted in the design of the reactor dimensions, dryer, and cooling char. Incoming energy was recorded at 564.87 kW (100%), with outgoing energy of 409.3 kW (72.46%) and heat loss of 155.57 kW (27.54%). Each component in the torefaction system has different thermal energy requirements. The rotary dryer requires 25.32 kW for drying, the rotary drum reactor requires 10.23 kW for the torefaction process, and the cooling char requires 60.77 kW for cooling. The system energy obtained is 102.24 kW for the reactor, 152.196 kW for the dryer, and 60.987 kW for the cooling char.

In conclusion, this pilot-scale torefaction system resulted in a tool design with a capacity of 100 kg/hour, which can optimize the utilization of organic waste as an efficient and environmentally friendly fuel.

Keywords: Renewable energy, Torrefaction, Waste, Energy Balance, Design.

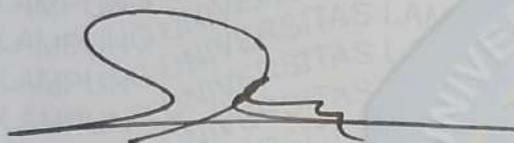
Judul Skripsi : **PERANCANGAN SISTEM TOREFAKSI  
SKALA PILOT KAPASITAS 100 KG/JAM UNTUK  
SAMPAH ORGANIK DI LINGKUNGAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG (UNILA)**

Nama Mahasiswa : Pico Tamara Berlia

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021052

Fakultas : Teknik

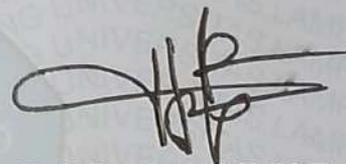
**MENYETUJUI**  
Komisi Pembimbing



**Dr. Amrul, S.T., M.T**

NIP. 19710331 199903 1 003

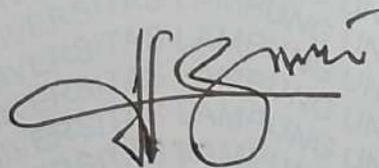
Ketua Jurusan Teknik Mesin



**Hadi Prayitno, S.T., M.T**

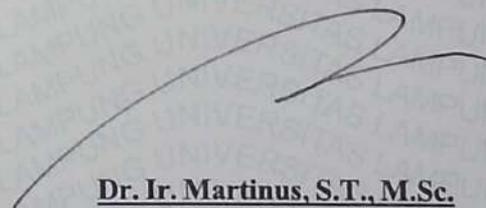
NIP. 19880514 2019031012

Ketua Program Studi  
S1 Teknik Mesin



**Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.**

NIP. 197108171998021003



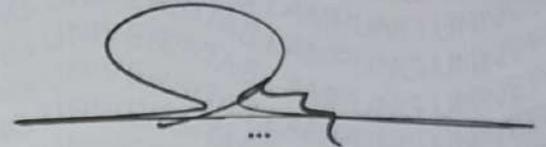
**Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**

NIP. 197908212003121003

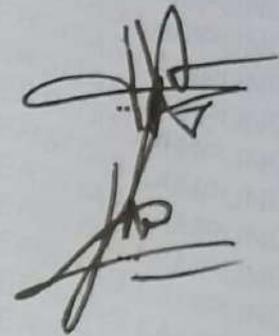
## MENGESAHKAN

## 1. Tim Penguji

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



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



Penguji Utama : Agus Sugiri, S.T., M.Eng.

## 2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 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, 7 Oktober 2024

Pembuat Pernyataan



**Pico Tamara Berlia**

NPM 2015021052

## MOTTO HIDUP

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا , إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

”Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah: 5-6)

“Orang lain gak akan paham *struggle* dan masa sulitnya kita, yang mereka ingin tahu hanya bagian *success storiesnya* aja. Jadi berjuanglah untuk diri sendiri meskipun gak akan ada yang tepuk tangan. Kelak diri kita di masa depan akan sangat bangga dengan apa yang kita perjuangkan hari ini. Jadi tetap berjuang ya.”

“Tantangan di perantauan adalah guru terbaik. Meskipun jauh dari rumah, setiap perjuangan mendekatkan kita pada mimpi. Dengan tekad dan semangat, mari kita selesaikan skripsi dan pulang membawa kebanggaan bagi diri sendiri dan keluarga”

## SANWACANA

### *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 Sistem Torefaksi Kontinu Skala Pilot Kapasitas 100 kg/jam Untuk Sampah Organik Di Lingkungan Universitas Lampung (Unila)”***. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ayahanda Eko Wandoyo dan Ibunda Sarmiatun yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis dapat tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Kakak penulis, *my sister and my brother* yang memberikan semangat materil dan moril bagi penulis selama 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. Agus Sugiri, S.T., M.Eng., 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. *Jacfruit Family*, Friska Desi Fitriani dan Tri Wahyuni Sari yang telah mendengarkan keluhan, selalu hadir memberi dukungan, semangat, dan tawa yang membuat hari-hariku lebih ceria.
11. *Torefaction team*, terdiri dari Andri Febriansyah, David Robby Mughni, 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 Waringinsari Timur, pada tanggal 14 Mei 2002 sebagai anak keempat, dari pasangan Bapak Eko Wandoyo dan Ibu Sarmiatun. Penulis bertempat tinggal di Provinsi Kalimantan Tengah, Sampit. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 3 MENTAWA BARU HULU hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 2 SAMPIT yang diselesaikan tahun 2017 dan SMA NEGERI 2 SAMPIT yang diselesaikan tahun 2020, hingga pada Tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) dengan KIP KULIAH.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Bendahara pada tahun 2021 kemudian menjabat Kepala Bidang Dana dan Usaha pada tahun 2023. Selain aktif dalam HIMATEM, penulis aktif dalam UKM Sains dan Teknologi (SAINTEK) sebagai anggota pada tahun 2022 kemudian menjabat Ketua Departemen KRT pada tahun 2023.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di **PT. Geo Dipa Energi Unit Patuha** berlokasi di sekitar Gunung Patuha di daerah Ciweday, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, tahun 2023 dengan judul laporan **“ANALISIS PERUBAHAN EFEKTIVITAS KINERJA KONDENSOR DALAM SATU PERIODE DI PLTP PT. GEO DIPA ENERGI (PERSERO) UNIT PATUHA.”**

Tahun 2024 penulis melakukan penelitian yang tergabung dalam tim Torefaksi dengan judul Penelitian **“PERANCANGAN SISTEM TOREFAKSI KONTINU SKALA PILOT KAPASITAS 100 KG/JAM UNTUK SAMPAH ORGANIK DI LINGKUNGAN UNIVERSITAS LAMPUNG (UNILA).”** 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 NOTASI.....	xiv
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Sampah .....	7
2.2 Proses Pengolahan Sampah .....	8
2.2.1 Pengolahan Sampah Melalui Proses Termal.....	8
2.2.2 Pengolahan Sampah Melalui Proses Non-Termal.....	10
2.3 Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) UNILA .....	12
2.4 Biomassa .....	14
2.5 Torefaksi.....	15
2.6 Komponen Sistem dalam Torefaksi .....	18
2.6.1 <i>Dryer</i> (pengering).....	18
2.6.2 <i>Burner</i> .....	18
2.6.3 <i>Reactor</i> .....	19

2.6.4	<i>Cooler</i> (Pendingin).....	20
2.7	Perpindahan panas .....	21
2.7.1	Konduksi .....	21
2.7.2	Konveksi .....	23
2.7.3	Radiasi.....	24
2.8	Mass Balance.....	24
2.9	<i>Energy Balance</i> .....	25
2.10	Diagram Sankey .....	26
III.	METODE PENELITIAN.....	28
3.1	Tahapan Penelitian .....	28
3.1.1	Studi Literatur .....	28
3.1.2	Pemilihan Sampah.....	28
3.1.3	Perancangan Komponen Alat Torefaksi .....	29
3.1.4	Analisis Kebutuhan Energi .....	29
3.1.5	Analisis $Q_{loss}$ dan Perpindahan Panas .....	29
3.1.6	Analisis <i>Mass Balance</i> dan <i>Energy Balance</i> .....	29
3.1.7	Pembuatan Skema Proses Torefaksi Kontinu .....	30
3.1.9	Kesimpulan .....	30
3.2	Alur Tahapan Penelitian .....	30
3.3	Tempat dan Waktu Penelitian .....	31
3.3.1	Tempat Penelitian.....	32
3.3.2	Waktu Penelitian .....	32
3.4	Alat dan Bahan .....	32
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1	Data Hasil Perhitungan.....	33
4.1.1	Spesifikasi pada alat sistem torefaksi.....	33
4.1.2	Kebutuhan energi pada sistem torefaksi .....	35
4.2	Pembahasan .....	40
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran .....	52
	DAFTAR PUSTAKA .....	53

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur dinding sel biomassa kayu. ....	15
Gambar 2.2 Analogi tahanan termal konduksi.....	23
Gambar 2.3 Perpindahan panas radiasi panas api yang sampai ke tubuh. ....	24
Gambar 2.4 Diagram Keseimbangan massa. ....	25
Gambar 2.5 Diagram Sankey. ....	27
Gambar 3.1 Skema proses torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah daun di UNILA. ....	30
Gambar 3.2 Diagram Alur Tahapan Pelaksanaan Penelitian. ....	31
Gambar 4.1 Desain sistem torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah organik di UNILA. (a) Desain tampak atas. (b) Desain tampak samping.....	45
Gambar 4.2 Neraca massa dan energi. ....	47
Gambar 4.3 Diagram Sankey. ....	49
Gambar 5.1 Hasil Desain sistem torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah organik di UNILA. ....	51

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Komposisi sampah berdasarkan jenis sampah (Kementerian Lingkungan Hidup ). .....	8
Tabel 2.2 Hasil Pengujian Sampah di Universitas Lampung.....	14
Tabel 4.1 Spesifikasi perancangan reaktor <i>rotary drum</i> torefaksi. ....	34
Tabel 4.2 Spesifikasi perancangan <i>rotary dryer</i> torefaksi. ....	34
Tabel 4.3 Spesifikasi perancangan <i>cooling char</i> torefaksi.....	35
Tabel 4.4 Parameter umum kebutuhan energi.....	36
Tabel 4.5 Parameter temperatur. ....	36
Tabel 4.6 Hasil perhitungan kebutuhan energi. ....	37
Tabel 4.7 Parameter neraca massa dan energi. ....	38
Tabel 4.8 Hasil analisis <i>heat loss</i> dan perpindahan panas sistem torefaksi. ....	39
Tabel 4.9 Data energi input, output, dan <i>loss</i> .....	40
Tabel 5.1 Hasil data <i>energy balance</i> . ....	52

### DAFTAR NOTASI

$A$	= Luas penampang ( $m^2$ )
$A_s$	= Luas penampang ( $m^2$ )
$C_p$	= Kapasitas panas pada tekanan tetap, ( $J/kg \text{ } ^\circ C$ )
$h$	= Koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$k$	= Konduktivitas termal ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
$\dot{m}$	= Massa benda yang menerima atau melepas kalor ( $Kg$ )
$Q_{in}$	= Energi input, kJ
$Q_{out}$	= Energi output, kJ
$Q_{loss}$	= Heat loss, kJ
$\dot{Q}$	= Laju perpindahan panas, (watt)
$\dot{Q}_{cond}$	= Perpindahan panas konduksi (W)
$\dot{Q}_{cylinder}$	= Perpindahan panas konduksi pada silinder (watt)
$\dot{Q}_{conv}$	= Perpindahan panas konveksi (W)
$\dot{Q}_{emit}$	= emisi yang dikeluarkan dari permukaan benda (W)
$r$	= Jari –jari lingkaran (m)
$T$	= Temperatur ( $^\circ C$ )
$T_s$	= Temperatur permukaan ( $^\circ C$ )
$T_\infty$	= Temperatur fluida ( $^\circ C$ )
$\Delta T$	= Perbedaan temperatur ( $^\circ C$ )
$\Delta T$	= Suhu ( $^\circ C$ )
$\Delta x$	= Jarak (m)
$\varepsilon$	= emissivity
$\sigma$	= $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Permintaan energi global yang meningkat dan kekhawatiran akan perubahan iklim mendorong penelitian teknologi untuk mencari bahan bakar terbarukan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Minat terhadap energi biomassa telah berkembang pesat karena biomassa dikenal sebagai sumber energi terbarukan yang tersedia di sebagian besar wilayah dunia. Energi dari biomassa diperoleh melalui proses termokimia seperti pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis (Haseli, 2018).

Kandungan energi biomassa dilepaskan selama pembakaran yang dapat digunakan sebagai sumber energi panas di sektor utilitas pembangkit listrik. Gasifikasi dan pirolisis adalah proses yang mengubah biomassa menjadi produk sampingan yang berguna seperti syngas (gasifikasi) dan minyak nabati (pirolisis) (Onsree, 2020). Biomassa memiliki beberapa kekurangan yang membatasi penggunaannya secara luas untuk pembangkitan energi yaitu seperti kepadatan curah rendah, kadar air tinggi, rendah nilai kalor, kebutuhan energi yang tinggi untuk penggilingan, dan rendah efisiensi pembakaran (Sermiyagina, 2015). Oleh karena itu, biomassa perlu diolah terlebih dahulu untuk meningkatkan sifatnya sebagai bahan bakar.

Peningkatan konsumsi energi dan peningkatan penumpukan sampah merupakan dua permasalahan yang sering terjadi seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan tingkat ekonomi. Salah satu penumpukan sampah atau sumber limbah yaitu sampah organik yang ada di

Universitas Lampung. Universitas Lampung dapat menghasilkan sampah  $\pm$  770 kg/hari yang sebagian besar didominasi oleh sampah organik seperti kertas bekas, sisa makanan, dan sampah pepohonan, serta sampah anorganik seperti kemasan plastik menurut (Pramita dkk., 2019). Universitas Lampung memiliki tempat pengolahan sampah yang disebut Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Universitas Lampung (TPST Unila).

TPST Unila merupakan mengolah sampah dan mengubah sampah menjadi benda yang lebih bermanfaat. Daun-daun kering dan sisa-sisa makanan diolah menjadi pupuk kompos sedangkan untuk sampah plastik dicacah dan dikeringkan. Namun pengomposan tidak dapat menyelesaikan masalah sampah secara tuntas karena proses pengomposan hanya terbatas pada sampah organik dan membutuhkan waktu yang lama. Sampah terus diproduksi setiap hari sedangkan pengomposan membutuhkan waktu berhari-hari. Akibatnya sampah terus menumpuk dan jumlahnya semakin meningkat di TPST. Oleh karena itu, diperlukan proses yang lebih cepat untuk mengolah sampah, salah satunya adalah proses termal yang dapat mengubah sampah menjadi energi berupa bahan bakar .

Universitas Lampung sendiri sudah memiliki satu alat torefaksi yang berada di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin. Reaktor torefaksi yang digunakan di Universitas Lampung ini bertipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket* dan memiliki kapasitas maksimum sebesar 5 kg/jam, akan tetapi hanya digunakan dalam skala laboratorium (Apriyanto, 2018). Proses torefaksi menjadi fokus perhatian karena memiliki dampak langsung terhadap kualitas produk dan biaya produksi.

Upaya untuk mengatasi masalah sampah di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Universitas Lampung (TPST Unila) membutuhkan alat baru yang lebih besar. Oleh karena itu perlu dirancang alat torefaksi skala pilot. Alat torefaksi tidak hanya terdiri dari satu komponen, tetapi beberapa komponen yang bekerja bersama dalam suatu sistem kontinu. Industri modern

dihadapkan pada tantangan untuk meningkatkan efisiensi proses produksi guna meminimalkan biaya dan memaksimalkan output. Dalam skala industri torefaksi kontinu lebih menguntungkan karena mengalir secara terus menerus dan memiliki biaya operasional yang rendah. Komponen utama sistem torefaksi *burner; dryer; reactor; dan cooler*.

Teknologi torefaksi adalah metode yang menjanjikan untuk memproses biomassa berkualitas rendah menjadi bahan baku dengan kepadatan energi tinggi. Torefaksi adalah proses termal yang terdiri dari pemanasan biomassa dalam lingkungan tanpa oksigen hingga suhu 300°C (Nhuchhen, 2014). Reaksi ini menghasilkan produk padat dengan kadar air yang lebih rendah, lebih padat, nilai kalor yang lebih tinggi, stabilitas mikroba yang lebih baik, lebih hidrofobik dan lebih keras daripada biomassa mentah. Karena sifat-sifat yang lebih baik ini, padatan ini dapat menggantikan sebagian batu bara dalam aplikasi domestik dan industri (Cardona, 2019).

Proses torefaksi membutuhkan panas untuk pengeringan biomassa dan proses torefaksi itu sendiri. Selain biomassa yang dibakar, proses ini menghasilkan aliran bahan bakar gas sebagai produk sampingan dan limbah panas dari pendinginan produk padat yang dibakar. Pembangkit listrik tenaga panas dan tenaga gabungan (CHP) berbahan bakar biomassa yang sangat cocok untuk diintegrasikan dengan proses *torrefaction* karena fasilitas logistik, penyimpanan dan penanganan bahan baku sudah ada, sumber panas potensial, pendingin untuk pemanasan dan pendinginan kebutuhan tersedia (Sermyagina, 2015).

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini memuat tentang Perancangan Sistem Torefaksi Kontinu Skala Pilot Kapasitas 100 kg/jam untuk Sampah Organik di Lingkungan Universitas Lampung (UNILA).

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mengintegrasikan *dryer*, *burner*, *reactor*, dan *cooler* dalam satu sistem yang terkoordinasi dengan baik?
2. Bagaimana proses pemindahan panas antar unit, khususnya transfer panas dari burner ke reactor dan dryer serta pendinginan oleh cooler, dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi?
3. Apa saja titik-titik kerugian panas dalam sistem torefaksi dengan desain baru dan bagaimana isolasi termal dapat ditingkatkan untuk mengurangi kerugian tersebut?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan desain sistem torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah organik di Unila.
2. Menentukan kebutuhan energi termal pada sistem torefaksi.
3. Menentukan nilai *energy balance*

## 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat batasan-batasan masalah adalah sebagai berikut :

1. Sampah yang digunakan adalah sampah daun dengan jenis dan bentuk tidak seragam di lingkungan Universitas Lampung.
2. Peneliti membatasi analisis *energy balance* hanya pada desain baru tidak menggunakan eksperimental.
3. Menggunakan parameter – parameter sesuai desain.
4. Bahan bakar pada *burner* yang digunakan adalah sekam padi.
5. Peneliti tidak memasukan spesifikasi *burner*.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

### I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang masalah secara jelas, tujuan yang memaparkan diadakannya penelitian ini, batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini agar hasil penelitian lebih terarah, sistematika penulisan yang dilakukan pada penelitian ini.

### II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab II ini berisikan landasan teori yang menunjang pada penelitian dan merupakan teori-teori dasar yang meliputi: penjelasan tentang sampah, pengolahan sampah, torefaksi, reaktor torefaksi, *burner*, *dryer*, *cooler* dan literatur tentang *mass balance* dan juga *energy balance*.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab III ini, penulis membahas mengenai pendekatan dan metode yang digunakan untuk mengumpulkan data dan jadwal pelaksanaan penelitian, serta menjelaskan langkah-langkah sistematis yang diambil oleh penulis dalam melaksanakan penelitian ini.

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV ini berisikan tentang hasil pengambilan data spesifikasi pada masing-masing alat torefaksi yaitu *burner*, *dryer*, *reactor*, dan *cooler*. Serta hasil analisis *energy balance* dari masing-masing komponen alat torefaksi saat proses penelitian ini.

### V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran yang dapat diambil atau diberikan dari penelitian yang telah dilakukan.

**DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan sumber dan literatur yang digunakan oleh penulis sebagai referensi dalam melakukan penelitian.

**LAMPIRAN**

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

## **II. TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Sampah**

Sampah merupakan limbah yang dihasilkan dari proses produksi baik domestik (rumah tangga) dan industri. Menurut Undang-undang No 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, disebutkan bahwa sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia atau proses alam yang berbentuk padat atau semi padat berupa zat organik atau anorganik bersifat dapat terurai atau tidak dapat terurai yang dianggap sudah tidak berguna lagi dan dibuang ke lingkungan. Isu sampah merupakan salah satu tantangan serius dalam lingkungan hingga saat ini, terutama terkait dengan meningkatnya aktivitas penduduk di kota. Permasalahan persampahan muncul sebagai konsekuensi dari peningkatan kegiatan tersebut.

Penyelesaian permasalahan sampah tampak sulit dicapai, terutama karena ketidaktepatan dalam sistem pengelolaan sampah. Tidak seimbangnya kemampuan menangani sampah dengan tingginya produksi manusia menyebabkan penumpukan sampah yang semakin meningkat. Perhatian yang khusus diberikan kepada isu sampah sebagai topik yang mendesak menunjukkan urgensi penanganan dari berbagai kalangan. Tanpa pengelolaan sampah yang tepat, potensi bencana "darurat sampah" dapat menjadi kenyataan yang mengkhawatirkan.

Sampah kota, yang saat ini umumnya dianggap sebagai sumber masalah, sebenarnya memiliki potensi energi yang belum banyak dimanfaatkan. Berdasarkan data yang didapat pada situs web kementerian lingkungan hidup dan kehutanan pada tahun 2023 mengatakan bahwa timbulan sampah di

Indonesia adalah sebesar 26,89 juta ton/tahun dimana telah terjadi penanganan sampah sebesar 50,86% atau 13,67 juta ton/tahun, dengan 66,27% atau 17,81 juta ton/ tahun sampah yang terkelola dan sampah yang tidak terkelola sebesar 9,7 juta ton/tahun. Sampah memiliki banyak jenisnya, adapun komposisi sampah berdasarkan jenis sampah di Indonesia dapat dilihat dari Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi sampah berdasarkan jenis sampah (Kementerian Lingkungan Hidup ).

No.	Jenis Sampah	Komposisi (%)
1.	Sisa Makanan	41,6
2.	Kayu/Ranting/Daun	11,7
3.	Kertas	10,7
4.	Plastik	18,6
5.	Karet/Kulit	2,2
6.	Kain	2,7
7.	Kaca	2,5
8.	Logam	3,4
9.	Dll	6,7

## 2.2 Proses Pengolahan Sampah

Ada beberapa jenis metode pengolahan sampah yang digunakan untuk mengelola berbagai jenis sampah. Dalam pengolahan sampah metode tersebut dibedakan menjadi dua yaitu termal dan non-termal, berikut adalah penjelasan masing-masing metode :

### 2.2.1 Pengolahan Sampah Melalui Proses Termal

Metode termal untuk pengolahan sampah yaitu melibatkan penggunaan panas tinggi untuk mengubah atau menghancurkan sampah. Secara umum pengolahan sampah secara termal yang

berkembang saat ini antara lain insinerasi, gasifikasi, pirolisis dan torefaksi. Berikut penjelasan perbedaan dari masing-masing metode :

**a. Insinerasi**

Insinerasi atau pembakaran adalah reaksi dari bahan-bahan yang mudah terbakar dalam sampah untuk menghasilkan panas, uap, air, nitrogen, karbondioksida dan oksigen. (Amrul, 2014). Dalam proses pembakarannya teknologi ini menggunakan alat yang disebut *incinerator*. Proses insinerasi memungkinkan transformasi energi kimia yang terkandung dalam limbah menjadi energi panas, dengan menggunakan udara berlebih pada suhu antara 850°C sampai 1200 °C. Cara kerjanya yakni dengan memasukkan semua jenis sampah kota kedalam *incinerator* tanpa perlu disortir terlebih dahulu, kapasitas pembakarannya bisa mencapai 50 ton per jam, sehingga mampu mengurangi volume dan massa sampah dengan kuantitas yang cukup besar (mencapai 80-90%) sehingga lahan TPA yang terbatas dapat dipakai lebih lama.

**b. Gasifikasi**

Gasifikasi adalah proses teknologi yang dapat mengubah bahan mentah apa pun yang mengandung karbon seperti batu bara menjadi bahan bakar gas yang dikenal sebagai gas sintesis (*syngas*) melalui proses pemanasan dengan suplai oksigen terbatas. Pada proses gasifikasi oksigen yang berasal dari udara, uap air, oksigen murni lainnya direaksikan dengan karbon tinggi untuk menghasilkan produk dalam bentuk gas, abu dan tar. Reaktor tempat terjadinya proses gasifikasi disebut *gasifier*.

Selama proses gasifikasi akan terbentuk daerah proses menurut distribusi temperatur dalam reaktor. Daerah–daerah tersebut adalah pengeringan, pirolisis, pembakaran, dan gasifikasi. Masing-masing daerah terjadi pada rentang suhu antara 25°C

hingga 150°C, 150°C hingga 600°C, 600°C hingga 900°C, dan 800°C hingga 1400°C. Produk luaran gasifikasi yang telah dimurnikan adalah komponen yang mudah terbakar yang terdiri dari campuran karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>) dan pengotor anorganik seperti NH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S, debu halus, serta pengotor organik yaitu tar.

### c. **Pirolisis**

Pirolisis adalah proses penguraian bahan organik melalui pemanasan pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen atau dengan oksigen sangat terbatas. Proses pirolisis menghasilkan tiga produk utama yaitu minyak pirolisis (*bio-oil*), gas dan arang (*char*). Komponen utama dari biomassa pirolisis adalah material lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin.

Selama proses pirolisis, kelembaban menguap pertama kali pada temperatur 100°C, kemudian hemiselulosa terdekomposisi pada temperatur 150-350°C, hasil dari degradasi hemiselulosa biasanya berupa volatil ringan, tar, dan arang, diikuti oleh selulosa pada 275-350°C, dan lignin 250-500°C dan ketika temperatur mencapai 500°C, reaksi pirolisis hampir selesai (Basu, 2013). Proses pirolisis pada temperatur rendah 200-300°C, dikenal dengan nama torefaksi. Tujuan dari torefaksi adalah untuk meningkatkan kualitas sifat pembakaran bahan bakar padat yang diperoleh dari biomassa atau sampah. Pembahasan lebih tentang torefaksi akan dijelaskan pada bagian 2.5.

### **2.2.2 Pengolahan Sampah Melalui Proses Non-Termal**

Metode non-termal dalam proses pengolahan sampah adalah teknik yang tidak menggunakan panas tinggi untuk mengolah atau mendaur ulang sampah. Berikut ini adalah beberapa metode non-termal.

**a. Daur Ulang (*Recycling*)**

Daur ulang adalah proses mengumpulkan dan mengolah bahan-bahan yang sudah tidak digunakan lagi menjadi produk baru atau bahan baku untuk membuat produk baru. Tujuan daur ulang adalah mengurangi penggunaan sumber daya alam baru, mengurangi volume sampah yang masuk ke tempat pembuangan akhir. Cara kerjanya yaitu bahan daur ulang dikumpulkan dari rumah, fasilitas umum kemudian sampah dipisahkan berdasarkan jenis materialnya seperti plastik, kertas, kaca dan logam bisa dilakukan secara manual atau menggunakan mesin otomatis.

Bahan yang sudah dipilah selanjutnya dibersihkan untuk menghilangkan kontaminan seperti sisa makanan dan bahan lain yang tidak diinginkan. Bahan yang bersih kemudian dihancurkan, dilebur, atau diubah bentuknya menjadi bahan baku yang dapat digunakan kembali. Misalnya kertas menjadi bubur kertas, platik dilelehkan dan logam dilebur. Contohnya kertas daur ulang digunakan untuk membuat kertas tulis atau karton, plastik untuk membuat botol baru.

**b. Kompos (*Composting*)**

Kompos adalah bahan-bahan organik seperti rumput, ranting, daun, sisa makanan dan limbah pertanian yang sudah mengalami proses pelapukan karena terjadi interaksi antara mikroorganisme atau bakteri pembusuk yang bekerja di dalam bahan organik tersebut. Kompos ini digunakan sebagai pupuk untuk memperbaiki struktur tanah dan menyediakan nutrisi bagi tanaman. Bahan organik untuk kompos dipotong atau dicacah menjadi bagian-bagian kecil untuk mempercepat proses dekomposisi.

Tumpukan kompos harus cukup lembab dan harus sering diaduk untuk memastikan adanya cukup oksigen bagi mikroorganisme.

Proses ini menghasilkan panas yang membantu mempercepat dekomposisi dan membunuh patogen. Setelah beberapa minggu hingga bulan, bahan organik akan terurai sepenuhnya menjadi kompos yang matang berwarna gelap, gembur, dan berbau seperti tanah. *Composting* memerlukan pengelolaan yang baik, termasuk pemantauan kelembaban.

### **2.3 Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) UNILA**

Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) merupakan suatu fasilitas yang strategis dalam upaya pengelolaan sampah di Indonesia. TPST dirancang sebagai tempat yang terkontrol dan terpadu untuk menangani berbagai jenis sampah. Fasilitas ini memiliki sistem pengelolaan yang canggih untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu tujuan utama TPST adalah melakukan pemilahan sampah agar dapat mendaur ulang sebanyak mungkin material yang dapat didaur ulang. Selain itu, TPST juga menyediakan area untuk memproses sampah organik melalui metode pengomposan. Beberapa TPST bahkan telah mengadopsi teknologi modern seperti incinerator atau Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) untuk mengkonversi sampah menjadi energi.

Dengan demikian, TPST tidak hanya berperan sebagai tempat pembuangan akhir, tetapi juga sebagai pusat pengelolaan sampah yang berusaha mengurangi volume sampah yang mencemari lingkungan. Penerapan TPST menjadi langkah penting dalam mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan di Indonesia. Dalam mengatasi masalah penumpukan sampah, Universitas Lampung juga memiliki Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST). Setiap harinya, universitas ini menghadapi pasokan sampah sekitar 770 kg/hari dan untuk mengurangi dampak penumpukan tersebut, mereka telah mengimplementasikan sistem komposter. Komposter menjadi solusi yang efektif dalam mengolah sisa-sisa organik, seperti sisa makanan dan dedaunan, menjadi kompos yang dapat

digunakan kembali sebagai pupuk organik. Dengan adanya TPST dan penggunaan komposter, Universitas Lampung bukan hanya menciptakan lingkungan yang lebih bersih di kampusnya, tetapi juga berkontribusi pada upaya mengurangi jumlah sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir.

Meskipun TPST UNILA telah memulai langkah positif dengan menggunakan komposter untuk mengatasi penumpukan sampah, perlu diakui bahwa komposter memiliki kelemahan tertentu. Salah satu keterbatasan utama adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengubah sampah menjadi kompos. Proses pengomposan memerlukan periode yang cukup panjang, dan hasilnya tidak dapat segera dinikmati. Akibatnya, meskipun ada penurunan dalam penumpukan sampah seiring waktu, masalah penumpukan sampah masih menjadi isu yang relevan di lingkungan universitas. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap metode pengelolaan sampah yang telah diterapkan, dan penerapan strategi tambahan yang lebih efisien dan cepat untuk mengatasi peningkatan volume sampah harian. Dengan demikian, Universitas Lampung dapat terus berinovasi dalam pengelolaan sampahnya, menjadikan lingkungannya lebih berkelanjutan dan memberikan dampak positif yang lebih cepat terhadap masalah penumpukan sampah.

Pada tahun 2019, dilakukan penelitian karakterisasi sampah di lingkungan Universitas Lampung oleh (Anungputri dkk., 2019) di TPST UNILA. Penelitian tersebut mengelompokkan sampah menjadi empat kategori utama, yaitu sampah kering, sampah abu, sampah basah, dan sampah jalanan. Hasil penelitian mengungkapkan komposisi sampah di Universitas Lampung pada periode tersebut dengan rincian 30% sampah kering, 15% sampah basah, 15% sampah abu, dan sekitar 40% sampah jalanan. Sampah basah terdiri dari sisa potongan hewan, sayur ataupun makanan. Sampah kering terdiri dari perumahan, pusat perdagangan, kantor yang dapat ataupun tidak dapat terbakar. Sampah abu terdiri dari sisa sisa pembakaran. Sampah jalanan terdiri kertas ataupun dedaunan dan lain lain yang berasal dari pembersihan

trottoar dan jalan (Anungputri dkk., 2019). Adapun hasil pengujian yang dilakukan peneliti tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hasil Pengujian Sampah di Universitas Lampung.

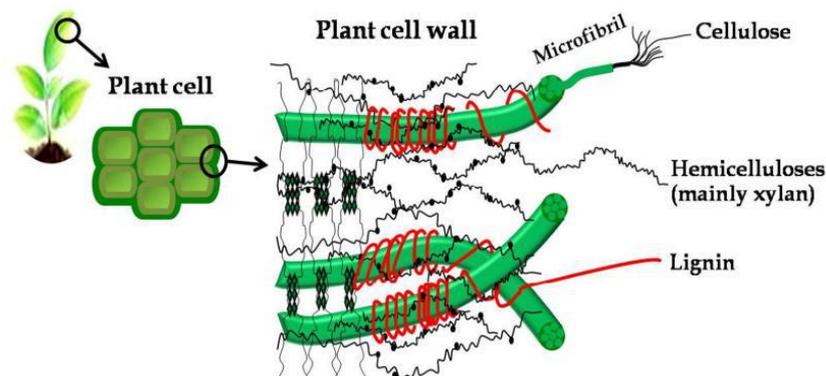
No	Kategori Sampah	Kadar Air (%)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Nilai Kalori (MJ/kg)
1	Sampah Kering	4,68	55,81	17,6
2	Sampah Abu	4,71	81,20	2,89
3	Sampah Basah	87,37	902,80	15,90
4	Sampah Jalanan	11,11	352,25	12,81

## 2.4 Biomassa

Biomassa adalah hasil dari proses fotosintesis yang mengubah karbon dioksida dan air menjadi campuran oksigen, karbon, dan hidrogen dengan penyerapan energi matahari. Komposisi biomassa umumnya didominasi oleh selulosa, hemiselulosa, lignin, dan komponen lainnya, berasal dari berbagai komoditas pertanian, produksi kayu, limbah padat, dan bahan bakar alkohol seperti tembakau, kopi, kakao, padi, dan jagung. Energi berbasis biomassa memiliki keunggulan, termasuk ketersediaan bahan baku yang luas, mengurangi emisi karbon, dan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil.

Indonesia memiliki potensi biomassa yang besar, terutama dari residu padi (sekam padi) dan residu kelapa sawit, sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia. Namun, pemanfaatan biomassa di Indonesia masih rendah, mungkin karena minimnya informasi mengenai energi biomassa. Biomassa yang digunakan umumnya berasal dari limbah atau bahan dengan nilai ekonomis rendah. Energi dari biomassa memiliki kelebihan, seperti dapat diperbarui dan berkontribusi pada sumber energi berkelanjutan dengan siklus CO<sub>2</sub> yang lebih pendek dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

Biomassa terdiri dari bahan lignoselulosa atau non lignoselulosa. Bahan lignoselulosa merupakan bagian dari tumbuhan non-pati yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Konversi biomassa lignoselulosa memerlukan pemahaman yang baik tentang struktur dinding sel dan komposisinya. Dinding sel tumbuhan terdiri dari selulosa, hemiselulosa, lignin, membran plasma, dan lamela tengah. Selulosa, sebagai polimer rantai panjang glukosa, memiliki sifat kristalin dan higroskopis yang mempengaruhi struktur biomassa. Hemiselulosa, dengan tingkat polimerisasi yang lebih rendah dibandingkan dengan selulosa, memiliki pengaruh signifikan pada hasil massa dalam proses torefaksi. Lignin, polimer tiga dimensi dengan ikatan C-O-C dan C-C dominan, terurai secara termal pada rentang temperatur yang luas, dengan stabilitas termal yang bervariasi tergantung pada gugus fungsi oksigen dalam strukturnya (Nhuchen dkk., 2014).



Gambar 2.1 Struktur dinding sel biomassa kayu.

(Sumber: Nhuchhen dkk., 2014)

## 2.5 Torefaksi

Torefaksi adalah pirolisis parsial biomassa yang dilakukan di bawah tekanan atmosfer pada kisaran suhu yang sempit yaitu 200-300°C, dan di bawah lingkungan yang *inert*. Ini menghasilkan tiga produk utama seperti produk padat berwarna gelap, produk berair asam berwarna kekuningan, dan produk gas yang tidak dapat dikondensasi. Torefaksi biasanya dilakukan pada laju

pemanasan yang rendah, yang memberikan hasil produk padat yang lebih tinggi (Acharya, 2013).

Torefaksi bertujuan untuk meningkatkan biomassa dan menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas yang lebih baik. Untuk memenuhi tujuan ini, biomassa di torefaksi dalam kondisi kering atau basah, yang disebut torefaksi kering dan torefaksi basah. Dalam torefaksi kering, biomassa dapat di torefaksi dalam kondisi kering dan non-oksidatif (*inert*) atau atmosfer oksidatif di mana suhu biasanya antara 200 dan 300°C. Selain dua metode yang disebutkan di atas, biomassa juga dapat diolah dengan uap untuk meningkatkan sifat-sifatnya (Chen, 2021).

Ada berbagai jenis proses torefaksi biomassa dan perubahan sifat biomassa torefaksi dapat dibagi menjadi lima tahap. Tahap yang pertama adalah pemanasan awal, tahap yang kedua adalah pengeringan, tahap ketiga adalah pemanasan pasca pengeringan dan pemanasan menengah, tahap keempat adalah torefaksi, dan tahap yang kelima adalah proses pendinginan. Menurut (Chen dkk., 2021). Mekanisme proses torefaksi dapat dijelaskan sebagai berikut ini yaitu :

1. Pada tahap pemanasan awal, biomassa dipanaskan hingga menjadi mencapai suhu yang diinginkan pada tahap pengeringan. Sementara itu, kelembaban di dalam biomassa secara bertahap dapat menguap di tahap ini.
2. Pada tahap pengeringan, suhu dipertahankan konstan hingga kadar air kritis tercapai, sedangkan air bebas biomassa diuapkan dengan laju konstan. Laju penguapan air mulai menurun ketika mencapai konsentrasi kelembaban kritis.
3. Pada tahap pasca-pengeringan dan pemanasan menengah, biomassa dipanaskan sampai suhu 200°C. Air yang terikat secara fisik dihilangkan sementara resistensi terhadap perpindahan massa dan panas ada dalam biomassa partikel. Biomassa hampir bebas dari kandungan air pada akhirnya dari tahap ini. Beberapa kerugian massal

dapat diperkirakan terjadi selama tahap ini, seperti akibat penguapan senyawa organik ringan.

4. Tahap torefaksi terdiri dari masa pemanasan dan pendinginan periode. Biomassa akan terbakar ketika suhu reaksi melebihi 200°C. Tahap ini dioperasikan pada suhu konstan disebut suhu torefaksi. Devolatilisasi dimulai selama periode pemanasan, berlanjut selama periode suhu konstan, dan berhenti selama atau setelah periode pendinginan.
5. Pada tahap pendinginan, suhu produk yang ditorefaksi didinginkan dari 300°C hingga suhu biochar yang telah ditorefaksi mencapai suhu dibawah titik nyala api. Pendinginan pada proses torefaksi penting dilakukan agar produk biomassa tidak langsung terbakar. Sehingga dibutuhkan sistem pendinginan setelah biomassa ditorefaksi. Tidak ada kerugian massal selama periode ini, meskipun ada beberapa penguapan produk reaksi yang teradsorpsi dapat terjadi (Chen dkk., 2021).

Dalam proses torefaksi, yang utama adalah perubahan besar dan transformasi yang terjadi di dalam biomassa dapat diprediksi terutama dengan memahami perilaku tiga konstituen polimer. Sebagai contoh hemiselulosa yang sangat reaktif komponen mengalami dekomposisi dan devolatilisasi, dan memberikan kontribusi bagian utama dari kehilangan massa dalam proses torefaksi (Bates, 2013). Torefaksi termasuk ke proses termal pengolahan sampah, torefaksi menawarkan sejumlah kelebihan yang signifikan dalam pengolahan biomassa menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi. Proses ini meningkatkan nilai kalor, mengurangi kadar air, dan menghasilkan bahan bakar yang lebih homogen dan stabil. Dengan pengurangan emisi dan biaya transportasi yang lebih rendah, torefaksi menjadi pilihan yang menarik untuk mengolah biomassa dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Oleh karena itu, proses torefaksi cocok untuk menyelesaikan permasalahan sampah yang ada di TPST UNILA.

## 2.6 Komponen Sistem dalam Torefaksi

Peran komponen sistem dalam proses torefaksi, seperti *Dryer*, *Burner*, *Reactor*, dan *Cooler*, sangat penting dalam mencapai hasil akhir yang diinginkan. Berikut adalah penjelasan singkat tentang peranan masing-masing komponen dalam proses torefaksi:

### 2.6.1 *Dryer* (pengering )

*Dryer* (pengering) digunakan untuk menghilangkan uap air dari bahan mentah atau bahan baku sebelum memasuki tahap pembakaran. Pengeringan ini meningkatkan efisiensi pembakaran dan mencegah pembentukan zat-zat yang tidak diinginkan selama proses torefaksi. Uap air dan bahan mentah lainnya yang berpotensi mengandung uap air dikeringkan dengan udara panas sebelum ke tahap pembakaran. Torefaksi kering terdiri dari empat langkah sederhana seperti (Pirraglia, 2013):

- a. Pengeringan, di mana hanya permukaan (bebas) kelembaban dihilangkan,
- b. Pasca-pengeringan, di mana uap air yang terikat kelembaban serta beberapa cahaya hidrokarbon dihilangkan,
- c. *Torrefaction* - pemanasan *isothermal* yang memasok panas membentuk depolimerisasi, sebagian devolatilisasi, dan sebagian reaksi karbonisasi
- d. Proses pendinginan (hingga suhu sekitar suhu,  $T_a$ ).

Waktu siklus keseluruhan dari proses kering proses torefaksi adalah jumlah dari waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan, pasca-pengeringan, torefaksi dan proses pendinginan.

### 2.6.2 *Burner*

*Burner* merupakan komponen yang membakar bahan bakar dan menghasilkan panas yang diperlukan untuk proses torefaksi. Pembakaran ini menghasilkan suhu tinggi yang diperlukan untuk

reaksi kimia dan pengeringan bahan mentah. Bahan bakar seperti batu bara, gas, dan minyak dibakar dalam pembakaran dengan udara atau oksigen untuk menghasilkan panas.

Hasil biomassa yang mudah menguap juga mengontrol suhu awal (Ton), laju pembakaran (R), suhu laju pembakaran maksimum (TR-max), dan suhu akhir pembakaran. Pembakaran oksidasi yang menggunakan oksigen murni dalam pembakaran telah menjadi perhatian besar. Artinya, penghapusan efek pengenceran nitrogen yang berasal dari udara menyebabkan efisiensi pembakaran yang tinggi, hasil termal yang tinggi, dan hasil CO<sub>2</sub> yang terkonsentrasi yang dapat diserap untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub>. Namun, reaktivitas pembakaran meningkat secara serius ketika oksigen murni digunakan dan ini merupakan kontradiksi dengan kebutuhan pengurangan reaktivitas biomassa (Haykiri-Acma, 2013). Efek gabungan dari perlakuan awal termal yang terkait dengan pembakaran dengan udara dan oksigen memiliki kepentingan praktis. Reaktivitas pembakaran dan parameter pembakaran harus dievaluasi dengan mempertimbangkan variasi sifat biomassa karena torefaksi (Bilgic, 2016).

### **2.6.3 Reactor**

*Reactor* adalah komponen di mana reaksi kimia yang diinginkan terjadi untuk menghasilkan produk torefaksi akhir. Proses reaksi kimia dalam reaktor dapat mencakup pembentukan zat baru dan konversi bahan mentah menjadi produk yang diinginkan. Bahan mentah, dikeringkan dan dipanaskan dalam pengering dan pembakar, dimasukkan ke dalam reaktor tempat terjadinya reaksi torefaksi kimia.

Reaktor umum seperti unggun bergerak, augur, unggun masuk, *microwave*, terfluidisasi unggun, hidrotermal, dan drum putar reaktor termasuk dalam salah satu dari dua ini kategori. Pergerakan biomassa, yaitu media kerja, dan perpindahan panas mekanisme adalah yang

paling penting. Kecepatan rotasi menentukan laju perpindahan panas, sedangkan panjang drum mempengaruhi waktu tinggal. Pada reaktor Torbed (fluidized bed), di mana fluida pembawa panas bergerak dengan kecepatan yang relatif tinggi, dicirikan oleh laju perpindahan panas yang intens. Reaktor ini dapat menghasilkan biomassa yang dibakar pada waktu yang sangat singkat waktu tinggal (sekitar 80 detik), saat menggunakan partikel halus (Duncan, 2013).

Sebuah studi perbandingan antara reaktor yang berbeda dengan menjaga semua kondisi lainnya tetap di mana mereka mengamati bahwa reaktor drum putar memiliki hasil produk padat yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor konvektif dan reaktor unggun terfluidisasi. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan perpindahan panas gas ke partikel pada jenis reaktor tertentu. Pada reaktor rotary drum, perpindahan panas utama dari reaktor ke partikel adalah melalui konduksi termal antara dinding reaktor dan partikel. Kemungkinan laju perpindahan panas yang tinggi ke partikel karena jatuh terus menerus aksi partikel dengan rotasi gerakan reaktor, mungkin salah satu alasan di balik produk padat yang lebih rendah hasil dalam reaktor drum putar. Tempat tinggal reaktor waktu dikontrol dengan mengubah rotasi sekrup kecepatan. Dalam sistem ini, suhu diukur dan dicatat secara teratur dengan termokopel yang ditempatkan di dalam pipa sekrup. (Kuai, 2013).

#### **2.6.4 Cooler (Pendingin)**

Pendingin digunakan untuk mendinginkan produk hasil torefaksi sebelum disimpan atau diproses lebih lanjut. Pendinginan ini mencegah perubahan fasa pada material dan meningkatkan stabilitas produk akhir. Produk torefaksi panas dari reaktor melewati pendingin dimana udara dingin atau cairan pendingin digunakan untuk menurunkan suhu material.

Sistem torefaksi terutama terdiri dari 4 sekrup unit. Tugas utama sekrup adalah sebagai berikut: itu sekrup pertama adalah pengumpan biomassa, sekrup kedua adalah pengering biomassa dan pemanas awal, sekrup ketiga adalah *torrefaction* reaktor, dan yang keempat adalah pendingin. *Biocoal* dari reaktor torefaksi diarahkan ke pendingin secara gravitasi, didinginkan secara tidak langsung hingga mencapai suhu kamar dengan menggunakan air keran, dan ditampung di tempat penyimpanan biobriket. Saluran nitrogen dihubungkan ke pintu masuk reaktor torefaksi dan ke penyimpanan *biocoal* untuk menyediakan atmosfer lembam di dalam reaktor dan untuk menjaga suhu tetap stabil selama dimulainya pengumpanan biomassa. Laju aliran nitrogen diukur dengan rotameter (Keivani, 2018).

## 2.7 Perpindahan panas

Perpindahan panas merupakan suatu proses perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu antar benda atau material . Kalor berpindah dari suhu tinggi ke suhu rendah. Operasi perpindahan panas sering terjadi di industri. Misalnya, panas yang dipindahkan melalui hasil akhir atau hasil antara digunakan dalam penukar panas untuk memanaskan bahan baku yang masuk ke reaktor, atau perpindahan panas dari tabung ke udara atau pembuangan panas. Di pembangkit listrik (Intan, N. 2015). Laju perpindahan panas, yang sering disebut sebagai laju perpindahan panas atau sering juga disebut laju aliran panas, mengacu pada jumlah panas yang dipindahkan per unit waktu. Perpindahan panas terjadi melalui tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

### 2.7.1 Konduksi

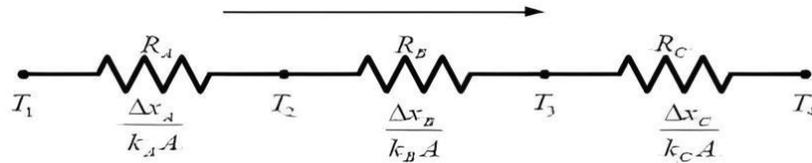
Konduksi Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang bersuhu tinggi ke suhu yang lebih rendah, tetapi media untuk perpindahan panas tetap.

Konduksi adalah proses perpindahan panas dari suatu bagian benda padat atau material ke bagian lainnya. Perpindahan panas secara konduksi dapat berlangsung pada benda padat, umumnya logam. Jika salah satu ujung sebuah batang logam diletakkan di atas nyala api, sedangkan ujung yang satu lagi dipegang, bagian batang yang dipegang ini suhunya akan naik, walaupun tidak kontak secara langsung dengan nyala api. Pada perpindahan panas secara konduksi tidak ada bahan dari logam yang berpindah. Yang terjadi adalah molekul-molekul logam yang diletakkan di atas nyala api membentur molekul-molekul yang berada di dekatnya dan memberikan sebagian panasnya.

Jika pada suatu logam terdapat perbedaan suhu, maka pada logam tersebut akan terjadi perpindahan panas dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Besarnya laju perpindahan panas ( $Q$ ) berbanding lurus dengan luas bidang ( $A$ ) dan perbedaan suhu logam tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Perpindahan panas tidak hanya terjadi pada padatan saja melainkan bisa terjadi pada benda cair dan gas, hanya saja konduktivitas terbesar itu terjadi pada padatan. Jika media perpindahan panas konduksi berupa gas, molekul-molekul yang suhunya tinggi akan bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas yang bersuhu rendah. Jika media perpindahan panas konduksi berupa cairan, mekanisme perpindahan panas yang terjadi sama dengan media gas, hanya saja kecepatan gerak molekul cairan sedikit lebih lambat. Nilai konduktivitas termal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Konduktivitas termal kebanyakan bahan merupakan fungsi suhu, dan bertambah sedikit kalau suhu naik, akan tetapi variasinya kecil dan sering kali diabaikan. Jika nilai konduktivitas thermal suatu bahan semakin besar, maka semakin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut. Karena itu, bahan

yang harga k-nya besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila k-nya kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator.



Gambar 2.2 Analogi tahanan termal konduksi.

(Sumber: Ningsih, S., 2021 )

### 2.7.2 Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas dimana cairan atau gas yang bertemperatur tinggi mengalir ke temperatur yang lebih rendah, memberikan panas ke permukaan yang suhunya lebih rendah. Perpindahan panas terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya. Jadi media panas ini memerlukan media penghantar berupa fluida cairan atau gas. Perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui 2 cara yaitu:

1. Konveksi bebas/konveksi alamiah.

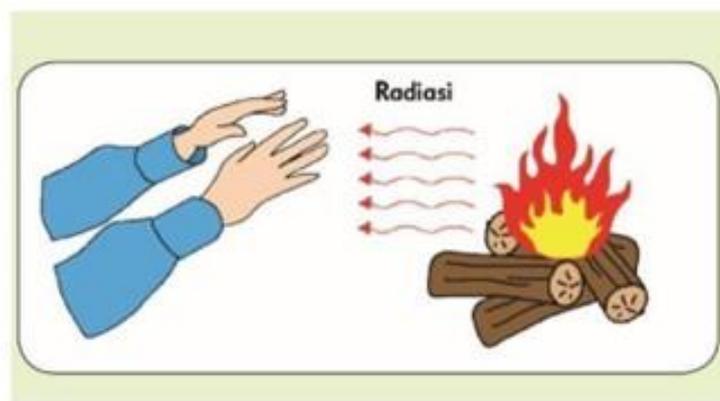
Adalah perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya. Contoh : plat panas dibiarkan di udara sekitar tanpa ada gerakan dari luar.

2. Konveksi paksaan

Adalah perpindahan panas yang aliran gas atau cairannya disebabkan adanya tenaga dari luar. Contoh : plat panas yang dihembus udara dari blower/kipas.

### 2.7.3 Radiasi

Perpindahan secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/radiasi gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas radiasi berlangsung elektromagnetik dengan panjang gelombang pada interval tertentu. Jadi perpindahan panas secara radiasi tidak memerlukan media, sehingga perpindahan panas dapat berlangsung pada ruangan hampa udara. Berbeda dengan mekanisme konduksi dan konveksi, radiasi tidak membutuhkan medium perpindahan panas. Sampainya sinar matahari ke permukaan bumi adalah contoh yang paling jelas dari perpindahan panas radiasi.

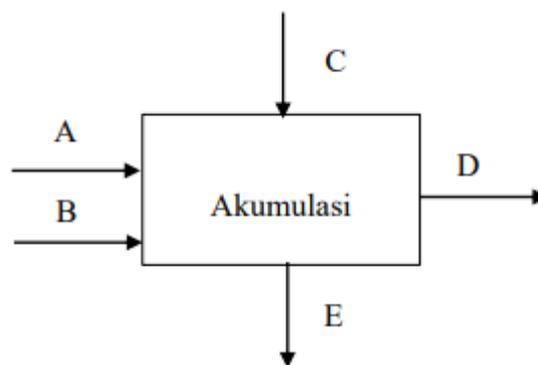


Gambar 2.3 Perpindahan panas radiasi panas api yang sampai ke tubuh.

(Sumber: Siahaan, 2016)

## 2.8 Mass Balance

*Mass balance* atau keseimbangan massa adalah teknik fundamental dalam berbagai bidang seperti kimia, teknik, dan fisika. Tujuan utama keseimbangan massa adalah untuk memastikan bahwa tidak ada material yang hilang atau tercipta selama proses berlangsung. Keseimbangan massa adalah suatu perhitungan yang tepat dari semua bahan-bahan yang masuk, yang terakumulasi dan yang keluar dalam waktu tertentu (Wuryanti, 2016). Prinsip keseimbangan massa adalah massa yang masuk sama dengan massa yang keluar. Bagan keseimbangan massa dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram Keseimbangan massa.

(Sumber: Wuryanti, 2016)

Simbol A, B, C, D, dan E menunjukkan massa masuk sedangkan A, B, dan C menunjukkan massa keluar. Jumlah residu sampah dapat dihitung dengan metode keseimbangan massa. Neraca massa adalah massa yang memasuki suatu sistem berdasarkan kekekalan massa harus meninggalkan sistem atau terakumulasi di dalam sistem.

## 2.9 *Energy Balance*

Keseimbangan energi atau neraca energi adalah persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara energi masuk dan energi keluar suatu sistem berdasarkan pada satuan waktu operasi. Keseimbangan energi melibatkan semua bentuk energi dalam suatu sistem termasuk energi panas, energi kimia, energi kinetik. *Energy Balance* pada suatu sistem adalah perbandingan jumlah energi yang masuk dengan jumlah energi yang keluar sistem.

Keseimbangan energi terdapat *Heat Balance* atau keseimbangan panas. Tujuan utama dari analisis *Heat Balance* adalah memastikan bahwa energi yang masuk ke dalam suatu sistem setara dengan energi yang keluar dari sistem tersebut, sehingga tidak ada energi yang hilang atau terbuang dengan sia-sia. Panas yang diberikan selama proses *torrefaction* memodifikasi struktur kompleks dari komponen-komponen polimer yang saling terkait.

Dengan demikian, proses ini memecah matriks hemiselulosa dan mendepolimerisasi struktur selulosa, yang mengakibatkan penurunan panjang serat.

Penguraian matriks hemiselulosa menghasilkan gas-gas yang mudah menguap seperti CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub>. Dekomposisi dan depolimerisasi komponen makro-polimer menjadi mikro-monomer, yang mengurangi panjang serat serta meningkatkan porositas, meningkatkan kemampuan giling biomassa. Peningkatan daya giling ini mengurangi kelangsingan pada partikel tanah, menghasilkan distribusi ukuran partikel yang seragam yang cocok untuk pembangkit listrik tenaga gasifikasi (Basu, 2013).

*Heat balance* didasarkan pada hukum pertama termodinamika . Hukum pertama termodinamika adalah kekekalan energi. Artinya, energi tidak dapat dimusnahkan atau diciptakan, hanya bentuknya saja yang dapat diubah. Tujuan dari *heat balance* adalah untuk mengukur tingkat efisiensi energi. Hal ini nantinya dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar kehilangan panas (*heat losses*) yang terjadi selama proses pengujian. *Heat balance* melibatkan beberapa komponen seperti energi masuk ( $Q_{in}$ ) dan energi keluar ( $Q_{out}$ ).

## 2.10 Diagram Sankey

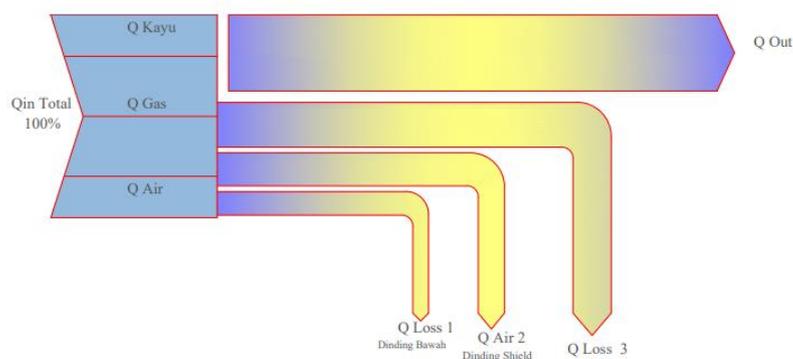
Diagram Sankey adalah visualisasi yang digunakan untuk menunjukkan aliran dari satu kumpulan nilai ke kumpulan nilai lainnya. Fungsi dari diagram adalah untuk menyajikan alur dari suatu proses atau informasi yang terdiri dari tanda panah yang memiliki keterangan di ujungnya. Diagram ini biasanya menunjukkan alur kerja.

Dalam pengertian lain, diagram Sankey adalah jenis diagram alur khusus yang lebar panahnya diplot dalam kaitannya dengan laju aliran. Diagram

Sankey mewakili total energi primer yang mengalir ke dalam sistem, dan lebar kumpulan energi berbanding lurus dengan produksi, penggunaan, dan kehilangan energi. Sumber energi primer adalah gas, listrik, dan batu bara/minyak, dan sisi kiri diagram Sankey mewakili masukan energi. Anda juga dapat memvisualisasikan tingkat energi, laju aliran material di tingkat regional atau nasional, dan rincian biaya barang atau jasa.

Diagram Sankey berbentuk seperti anak panah dan memiliki cabang. Beberapa anak panah di Sankey mungkin memiliki tingkatan atau juga tidak memiliki tingkatan. Hal ini karena Sankey pada dasarnya adalah diagram alur proses, mirip dengan diagram alur. Namun ada perbedaan antara diagram Sankey dan diagram alur. Diagram alur lebih terstruktur dan mencakup instruksi untuk setiap proses. Diagram alur digunakan untuk memecahkan masalah melalui langkah-langkah yang berurutan, sedangkan diagram Sankey tidak.

Contoh penerapan diagram Sankey melibatkan beberapa blok atau node yang terhubung oleh panah dengan lebar yang bervariasi. Misalnya, dalam konteks energi, diagram Sankey dapat menunjukkan bagaimana energi dari sumber daya alam (seperti matahari atau bahan bakar fosil) mengalir melalui berbagai tahapan seperti pembangkit listrik, distribusi, dan penggunaan akhir. Contoh diagram Sankey dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.5 Diagram Sankey.

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### 3.1.1 Studi Literatur

Tahapan yang pertama adalah studi literatur. Dilakukan identifikasi dan pilih sistem torefaksi yang akan menjadi kasus studi, kemudian pilih instalasi torefaksi yang representatif dan relevan, dan pastikan bahwa kasus studi mencakup semua komponen seperti *dryer*, *burner*, *reactor*, dan *cooler*. Selain itu dimulai dengan mempelajari perancangan, analisis kebutuhan energi, dan sistem pemanas yang digunakan. Studi literatur juga dapat menentukan jenis apa yang akan dirancang, dan disesuaikan kembali dengan pertimbangan pada keadaan yang cocok untuk dapat direalisasikan nantinya.

##### 3.1.2 Pemilihan Sampah

Memilih jenis sampah yang tepat untuk torefaksi sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal dan efisien. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan bahan baku meliputi ketersediaan, kandungan air, kandungan zat organik, dan komposisi kimia. Biomassa dengan kandungan air rendah dan nilai kalor tinggi umumnya lebih disukai untuk proses torefaksi.

### **3.1.3 Perancangan Komponen Alat Torefaksi**

Tahapan kedua yaitu membuat rancangan dengan hasil pertimbangan dari analisis dimensi yang dibutuhkan dan yang akan dirancang, seperti ukuran diameter, panjang, dan derajat kemiringan yang akan dipakai. Sistem pemanas dan pendingin yang digunakan. Tahap ini menghasilkan spesifikasi sistem torefaksi.

### **3.1.4 Analisis Kebutuhan Energi**

Tahapan ketiga yaitu menganalisis kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk melakukan proses torefaksi. Setelah mendapatkan dimensi atau spesifikasi dari masing-masing komponen selanjutnya menghitung analisa kebutuhan energi. Analisa energi ini digunakan sebagai acuan dalam melakukan perhitungan *heat loss* dan perpindahan panas.

### **3.1.5 Analisis Qloss dan Perpindahan Panas**

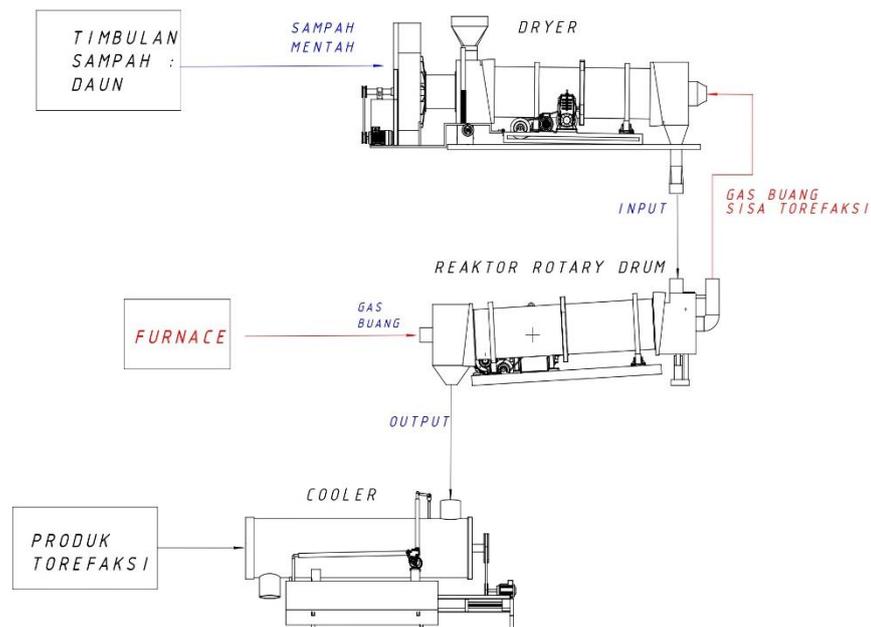
Tahapan keempat yaitu menganalisis perpindahan panas dari komponen alat torefaksi yang sudah dirancang tersebut. Perpindahan panas yang terjadi dapat berupa konduksi dan konveksi.

### **3.1.6 Analisis *Mass Balance* dan *Energy Balance***

Tahapan kelima yaitu menganalisis *mass balance* dan *energy balance*. Analisis neraca massa bertujuan untuk mengidentifikasi jumlah massa yang masuk dan keluar dari sistem torefaksi. Langkah ini melibatkan perhitungan massa biomassa mentah yang dimasukkan ke dalam reaktor, massa produk torefaksi yang dihasilkan, serta massa gas dan cairan yang dihasilkan selama proses. Analisis neraca energi bertujuan untuk mengidentifikasi jumlah energi yang masuk dan keluar dari sistem torefaksi. Langkah ini melibatkan perhitungan energi yang dibutuhkan untuk pemanasan biomassa, energi yang dilepaskan selama proses torefaksi, serta energi yang tersimpan dalam produk akhir.

### 3.1.7 Pembuatan Skema Proses Torefaksi Kontinu

Tahapan keenam yaitu setelah adanya desain dari masing-masing komponen alat torefaksi maka perlu membuat skema proses torefaksi kontinu hal ini untuk mengetahui proses dari alat torefaksi kontinu itu sendiri. Adapun skema keseluruhan dari proses torefaksi dari alat yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



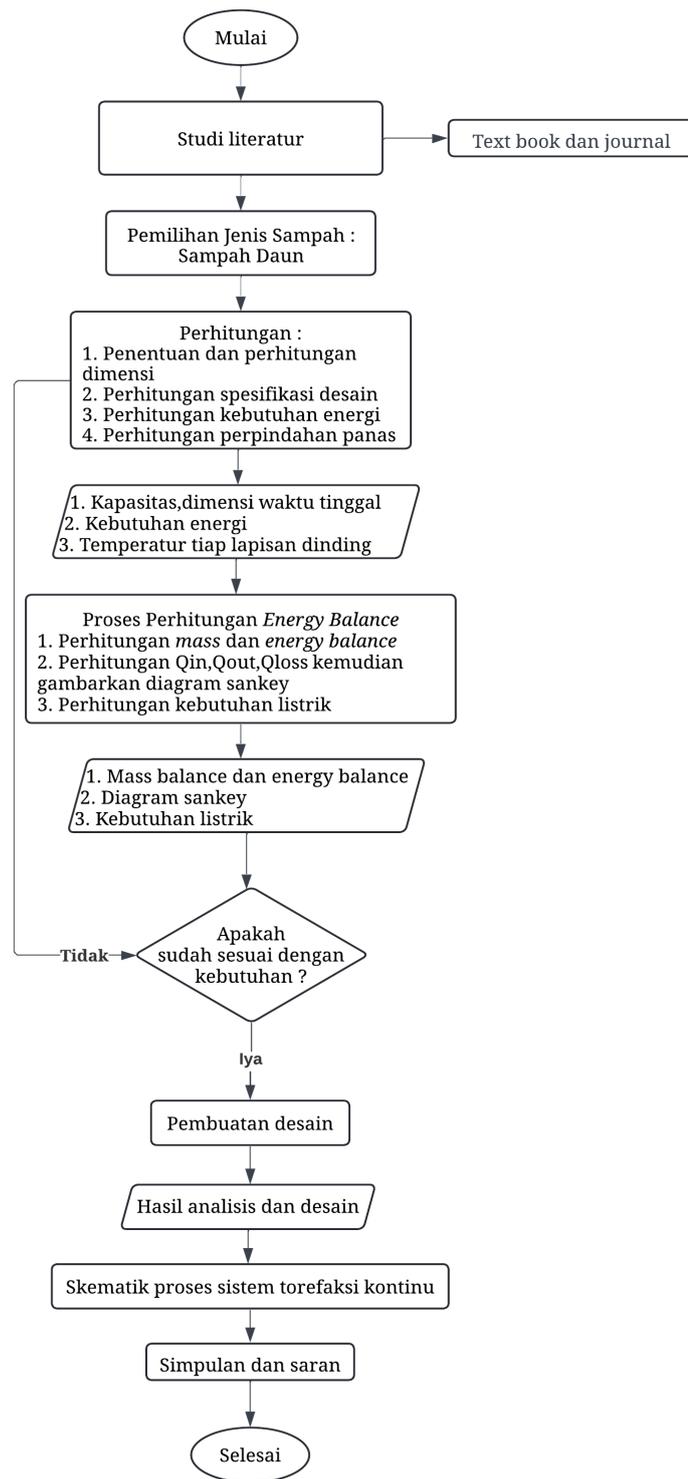
Gambar 3.1 Skema proses torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah daun di UNILA.

### 3.1.8 Kesimpulan

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

## 3.2 Alur Tahapan Penelitian

Berikut pada Gambar 3.2 merupakan flowchart alur penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram Alur Tahapan Pelaksanaan Penelitian.

### 3.3 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun untuk waktu dan tempat yang akan dilakukan pada saat proses penelitian ini adalah sebagai berikut :

### **3.3.1 Tempat Penelitian**

Proses analisis dilakukan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

### **3.3.2 Waktu Penelitian**

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari 2024 hingga bulan Juli 2024.

## **3.4 Alat dan Bahan**

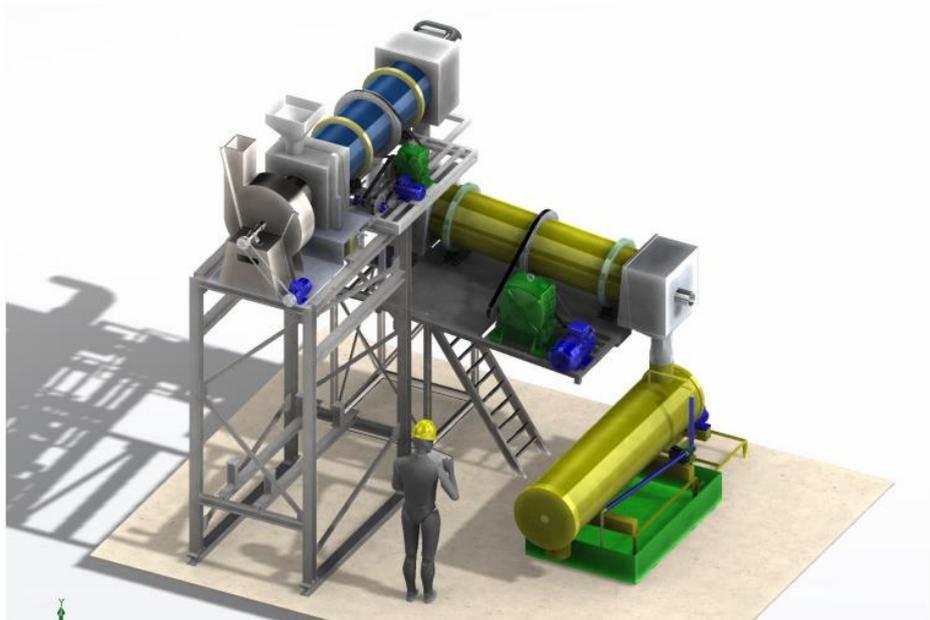
Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu *reactor*, *dryer*, *burner*, dan *cooler* pada alat torefaksi dalam bentuk desain. Perangkat lunak untuk pengolahan data yaitu *Ms.Word* dan *Ms.Excel*. Untuk mengolah diagram sankey menggunakan aplikasi e-sankey edisi 5.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan hasil perhitungan serta hasil analisis yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Sistem torefaksi skala pilot yang dirancang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *dryer*, *reactor*, dan *cooler*. Kemudian ketiga desain diassembling sehingga menghasilkan desain sistem torefaksi skala pilot untuk sampah organik di Unila.



Gambar 5.1 Hasil Desain sistem torefaksi kontinu skala pilot untuk sampah organik di UNILA

2. Setiap komponen sistem torefaksi dalam proses torefaksi memiliki kebutuhan energi termal yang berbeda. *Rotary dryer* memerlukan daya atau energi untuk proses pengeringan sebesar 25,32 kW. Daya total yang dibutuhkan reaktor *rotary drum* yang dirancang untuk melakukan proses torefaksi adalah sebesar 10,23 kW dan kebutuhan daya selama proses pendinginan *cooling char* sebesar 60,77 kW.
3. Hasil perhitungan yang diperoleh untuk *energy balance* dari sistem torefaksi dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil data *energy balance*.

Data	Simbol	Nilai	Satuan
Energi masuk	$Q_{in}$	564,87	kW
Energi keluar	$Q_{out}$	409,3	kW
	$Q_{loss\ dryer}$	0,304	kW
	$Q_{loss\ reactor}$	0,637	kW
Energi loss	$Q_{loss\ cooling\ char}$	0,356	kW
	$Q_{loss\ lain-lain}$	154,273	kW

## 5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan untuk kemajuan dan perkembangan dari penelitian mengenai perancangan sistem torefaksi ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini diharapkan dilanjutkan dengan menambahkan desain baru untuk sumber panas yaitu burner.
2. Penelitian ini diharapkan dapat dilanjutkan dengan simulasi untuk memperoleh hasil yang lebih realistis dibandingkan perhitungan teoritis.
3. Penelitian ini diharapkan dapat direalisasikan melalui fabrikasi alat untuk memungkinkan pengujian eksperimental.

## DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B. (2013). *Torrefaction and pelletization of different forms of biomass of ontario* . (Doctoral dissertation, University of Guelph).
- Amrul,. 2014. Pemanfaatan Sampah Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Melalui Proses Torefaksi. Disertasi Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Anungputri, P.S., Yuliandari, P., Suroso, E. (2019). Karakterisasi Sampah di Lingkungan Universitas Lampung. *Journal of Tropical Upland Resource*. Vol.1, No.1, Hal 171-175.
- Apriyanto, A (2020). Torefaksi Kontinu Munciple Solid Waste (MSW) Pada Screw Conveyor Reaktor Dengan Sistem Pemanas Heat Transfer Oil. *Jurnal Teknik Sains*, Vol.5, No.1.
- Basu, P. (2013). Effect of oxygen presence in torrefier. . *Journal of the Energy Institute*, 86(3), 171–176.
- Bates, R. (2013). Biomass torrefaction: Modeling of reaction thermochemistry. *Bioresource Technology*, 134, 331–340.
- Bilgic, E. (2016). Is torrefaction of polysaccharides-rich biomass equivalent to carbonization of lignin-rich biomass? *Bioresource Technology*, 200, 201–207.
- Cardona, S. (2019). Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 17–24.
- Chen, W. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100887.

- Duncan, A. (2013). Torrefied, spherical biomass pellets through the use of experimental design. *Applied Energy*, *101*, 237–243.
- Harrison, H., Birks, M., Franklin, R., & Mills, J. (2017, January). Case study research: Foundations and methodological orientations. In *Forum qualitative Sozialforschung/Forum: qualitative social research* (Vol. 18, No. 1).
- Hasan, M., & Haseli, Y. (2020). An Oxyfuel Combustion-Based Torrefaction Process: Technoeconomic Analysis. *Journal of Energy Resources Technology*, *142*(3), 032205.
- Haseli, Y. (2018). Process modeling of a biomass torrefaction plant. *Energy & Fuels*, *32*(4), 5611–5622.
- Haykiri-Acma, H. (2013). Co-combustion of low rank coal/waste biomass blends using dry air or oxygen. *Applied Thermal Engineering*, *50*(1), 251–259.
- Intan, N. (2015). Alat Peraga Laju Hantaran Kalor Konduksi, Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika (SNFPF) Ke-6 2015 270 Volume 6 Nomor 1 2015 ISSN : 2302-7827. Program Studi Pendidikan Fisika PMIPAFKIP UNS Surakarta, Indonesia.
- Keivani, B. (2018). Torrefaction of pine wood in a continuous system and optimization of torrefaction conditions. *International Journal of Energy Research*, *42*(15), 4597–4609.
- Kuai, N. (2013). Experiment-based investigations on the effect of ignition energy on dust explosion behaviors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *26*(4), 869–877.
- Manouchehrinejad, M., & Mani, S. (2019). Process simulation of an integrated biomass torrefaction and pelletization (iBTP) plant to produce solid biofuels. *Energy Conversion and Management: X*, *1*, 100008.
- Nhuchhen, D. (2014). A comprehensive review on biomass torrefaction. *Int. J. Renew. Energy Biofuels*, 1–56.

- Onsree, T. (2020). Techno-economic assessment of a biomass torrefaction plant for pelletized agro-residues with flue gas as a main heat source. *Energy Reports*, 6, 92–96.
- Pirraglia, A. (2013). Technical and economic modeling for the production of torrefied lignocellulosic biomass for the US densified fuel industry. *Bioenergy Research*, 6, 263–275.
- Sermyagina, E. (2015). Effect of heat integration method and torrefaction temperature on the performance of an integrated CHP-torrefaction plant. *Applied Energy*, 149, 24–34.
- Thengane, S. K., Kung, K. S., Gomez-Barea, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. *Progress in Energy and Combustion Science*, 93, 101040.
- Wuryanti, Sri. 2016. Neraca Massa dan Neraca Energi. Politeknik Negeri Bandung. Bandung: Jurusan Teknik Konversi Energi.