

**STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT DENGAN
VARIASI UKURAN SAMPEL UNTUK MENDAPATKAN BAHAN
BAKAR PADAT BERNILAI KALOR TINGGI SETARA
DENGAN BATUBARA**

(Skripsi)

Oleh:

**FADHLAN 'AZHIM
NPM 1915021029**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT DENGAN
VARIASI UKURAN SAMPEL UNTUK MENDAPATKAN BAHAN
BAKAR PADAT BERNILAI KALOR TINGGI SETARA
DENGAN BATUBARA**

Oleh

Fadhlan 'Azhim

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRACT***EXPERIMENTAL STUDY OF PALM FROND TOREFACTION
WITH VARIATION IN SAMPLE SIZES TO OBTAIN HIGH
CALORIFIC SOLID FUEL EQUIVALENT TO COAL***

By

Fadhlan 'Azhim

The use of biomass as a solid fuel can reduce a country's carbon emissions and decrease dependence on fossil fuel-based primary energy sources that have adverse environmental impacts. However, the utilization of biomass needs to be accompanied by effective resource management and strategic planning in the sustainable development of renewable energy to maintain resource sustainability and reduce environmental impacts. Palm fronds are agricultural waste that has the potential to be processed as an alternative fuel due to its abundant availability. In its utilization, an optimal torrefaction process is required to improve the characteristics of palm fronds to approach coal characteristics. The torrefaction process itself can increase calorific value and reduce unwanted volatile substances, such as nitrogen oxides and sulfur oxides. This torrefaction process of palm fronds is carried out by varying the size of the palm frond biomass products, such as chunks, chips, and powder, at a temperature of 275°C with a residence time of 30 minutes. The equipment used is a continuous tubular reactor torrefaction type with an oil jacket heating system. This research is able to increase the calorific value of raw palm fronds. The highest calorific value is found in the chip size at 6191 kcal/kg, which represents an increase of 32% from the initial calorific value. This torrefaction process is able to reduce the percentage of moisture content and volatile matter, while increasing the percentage of fixed carbon.

Keywords: Biomass, Torrefaction, Palm Fronds, Calorific Value.

ABSTRAK**STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT DENGAN
VARIASI UKURAN SAMPEL UNTUK MENDAPATKAN BAHAN
BAKAR PADAT BERNILAI KALOR TINGGI SETARA
DENGAN BATUBARA****Oleh****Fadhlan 'Azhim**

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar padat dapat mengurangi emisi karbon suatu negara dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi primer berbahan bakar fosil yang berdampak buruk bagi lingkungan. Meskipun demikian, pemanfaatan biomassa perlu disertai dengan tata kelola sumber daya yang efektif dan perencanaan strategis dalam pengembangan energi terbarukan secara berkelanjutan, agar dapat mempertahankan keberlanjutan sumber daya serta mengurangi dampak terhadap lingkungan. Pelepah sawit merupakan limbah pertanian yang berpotensi untuk diolah sebagai bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang sangat melimpah. Dalam pemanfaatannya proses torefaksi yang optimal diperlukan untuk meningkatkan karakteristik pelepah sawit agar mendekati karakteristik batubara. Proses torefaksi sendiri dapat meningkatkan nilai kalor, mengurangi zat volatil yang tidak dibutuhkan. Proses torefaksi pelepah sawit ini dilakukan dengan memvariasikan ukuran produk biomassa pelepah sawit berupa bongkahan, cacah, dan serbuk dengan temperatur 275°C dengan waktu tinggal selama 30 menit. Peralatan yang digunakan berupa reaktor torefaksi tipe kontinu tubular sistem pemanas *oil jacket*. Hasil penelitian ini mampu meningkatkan nilai kalor dari pelepah sawit mentah. Nilai kalor tertinggi terdapat pada ukuran cacah sebesar 6191 kkal/kg atau mengalami kenaikan sebesar 32% dari nilai kalor awal. Proses torefaksi ini mampu mengurangi persentase kadar air dan zat volatil serta meningkatkan persentase *fixed carbon*.

Kata Kunci: Biomassa, Torefaksi, Pelepah Sawit, Nilai Kalor.

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : **STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI
PELEPAH SAWIT DENGAN VARIASI
UKURAN SAMPEL UNTUK MENDAPATKAN
BAHAN BAKAR PADAT BERNILAI KALOR
TINGGI SETARA DENGAN BATUBARA**

Nama Mahasiswa : **Fadhlan Azim**

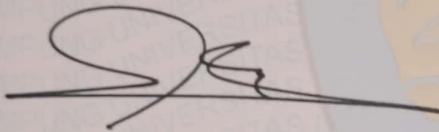
Nomor Pokok Mahasiswa : **1915021029**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

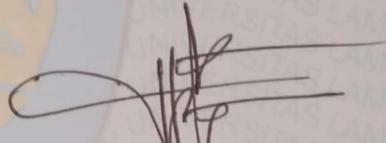
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



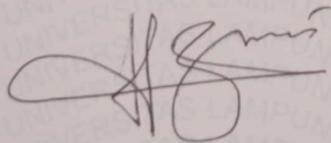
Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 197103311999031003

Komisi Pembimbing 2



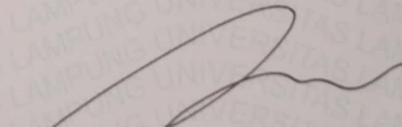
Hadi Prayitno, S.T., M.T.
NIP. 198805142019031012

**Ketua Jurusan
Teknik Mesin**



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

**Ketua Program Studi
S1
Teknik Mesin**

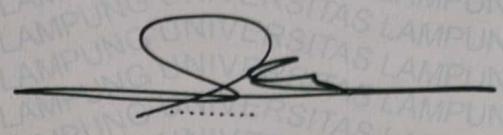


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

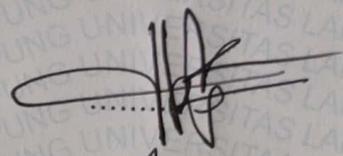
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

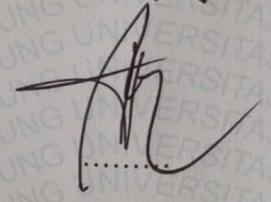
Ketua Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



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



Penguji Utama : **Dr. Amrizal, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **26 Februari 2024**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebut dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 Maret 2024



Fadhlan 'Azhim
1915021029

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Padang pada tanggal 14 Agustus 2000, yang merupakan anak Pertama dari pasangan Bapak Harmen dan Ibu Mega Usman. Penulis memulai pendidikan pertama kali di Taman Kanak-kanak (TK) di TKIT Alam Ulul Ilmi Kota Bandar Lampung pada Tahun 2004-2005, lalu melanjutkan pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDIT Permata Bunda Kota Bandar Lampung dan menyelesaikannya pada tahun 2012, lalu melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPIT Daarul Ilmi Kota Bandar Lampung dan menyelesaikannya pada tahun 2015. Kemudian Penulis melanjutkan Sekolah Menengah Kejuruan (SMA) di SMA PGII 2 Bandung dan menyelesaikannya pada tahun 2018.

Selanjutnya pada tahun 2019 Penulis tercatat sebagai Mahasiswa Universitas Lampung pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin yang diterima melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negara (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai sekretaris Bidang Humas pada tahun 2020. Penulis aktif dalam kegiatan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Ketua Himpunan pada tahun 2021. Penulis melakukan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Pupuk Sriwidjaja dibagian Mekanik IV dengan judul “Analisis Performa Pada Marley *Cooling Tower Series 15* Di PT. Pupuk Sriwidjaja”. Kemudian penulis melakukan penelitian untuk menyelesaikan tugas akhir di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik dengan judul “Studi Eksperimental Torefaksi Pelepah Sawit Dengan Variasi Ukuran Sampel Untuk Mendapatkan Bahan Bakar Padat Bernilai Kalor Tinggi Setara Dengan Batubara”.

MOTTO

“Berfikirlah positif, tidak peduli seberapa keras kehidupanmu.” (Ali bin Abi Thalib)

*“Satu-satunya cara untuk melakukan pekerjaan yang hebat adalah dengan mencintai apa yang kamu lakukan
lakukan
(Steve Jobs)*

**“HOWEVER DIFFICULT LIFE MAY SEEM, THERE IS ALWAYS SOMETHING YOU
CAN DO AND SUCCEED AT.** (Stephen Hawking)

*“Seseorang yang tidak pernah melakukan kesalahan, tidak pernah
mencoba sesuatu yang baru (Albert Einstein)*

Tak pernah ada kata terlambat untuk belajar.

**“If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of
giants”** (Issac Newton)

*“Jangan takut salah dan berbuat alfa, sebab dari situ para
pembelajar bisa dewasa.”* (Najwa Shihab)

**“Orang yang meraih kesuksesan tidak selalu orang yang pintar. Orang yang
selalu meraih kesuksesan adalah orang yang gigih dan pantang menyerah.”**
(Susi Pudji Astuti)

***“Segala hal yang dilakukan tanpa restu kedua orang tua hanya akan
mengarah pada kehancuran belaka”***
(Fadhlan ‘Azhim)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahrabbi'l'amin dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT,
Karya ini
Dipersembahkan kepada:

Kedua Orang Tua Saya

Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T.

dan

Ibu Mega Usman, S.Pd.

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan puteranya sehingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana Teknik Mesin

Terimakasih atas segala dukungan motivasi serta masukan dan saran yang telah diberikan sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini

Seluruh Teman-Temanku

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan.

Almamater Tercinta
UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ku ucapkan atas kehadiran Allah SWT karena atas berkat dan Rahmat serta karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Studi Eksperimental Torefaksi Pelepah Sawit Dengan Variasi Ukuran Sampel Untuk Mendapatkan Bahan Bakar Padat Bernilai Kalor Tinggi Setara Dengan Batubara”. Tujuan dari penulisan skripsi ini yaitu sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar S1 dan untuk melatih mahasiswa dalam berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah. Penulis menyadari masih adanya kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis meminta kritik dan saran yang dapat membangun dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis

Fadhlan ‘Azhim

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkanNya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Skripsi dengan mempersembahkan judul “Studi Eksperimental Torefaksi Pelepah Sawit Dengan Variasi Ukuran Sampel Untuk Mendapatkan Bahan Bakar Padat Bernilai Kalor Tinggi Setara Dengan Batubara” dengan sebaik-baiknya, sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih atas semua bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak, untuk itu dengan segala ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih antara lain kepada:

1. Kedua Orang Tuaku tercinta Mega Usman dan Harmen atas segala nasehat yang telah diberikan, atas semua kasih sayang yang tulus, atas segala pengorbanan dan perjuangan untuk memberikan pendidikan yang terbaik untuk anaknya, serta air mata do'a yang tulus yang terus menerus mengalir untuk mendo'akan anaknya.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T.,M.T.,Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama Skripsi ini, yang banyak memberikan waktu, arahan, semangat, serta motivasi bagi penulis.
6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua Skripsi yang telah memberikan ide, arahan dan juga waktu bagi penulis.
7. Bapak Dr. Amrizal, S.T., M.T. sebagai pembahas Skripsi yang memberikan kritik dan saran yang sangat bermanfaat bagi penulis.
8. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu dan pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi diperkuliahan.
9. Staf akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan Skripsi ini.

10. Keluarga besar Nasir Daud yang selalu memberikan semangat, selalu mengingatkan dan memberikan nasehat-nasehat, serta mendoakan agar dapat menyelesaikan Skripsi ini.
11. Saudariku Afifah At-Thaharra Mazaya yang telah memberi semangat, memberi nasehat-nasehat dan masukan-masukan serta memberi dukungan moril maupun materil selama penulisan skripsi.
12. Sintia Viana yang sudah mau mendengarkan keluh kesah, memberikan dukungan penulis selama mengerjakan skripsi, menemani dalam proses pengerjaan skripsi dan membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
13. Rekan-rekan penelitian yang telah memberikan dukungan, membantu dalam proses penelitian dan berbagi ilmu dalam penyelesaian skripsi ini.
14. Rekan-rekan Torefaksi yang telah membantu dan berbagi ilmu dalam penyelesaian Skripsi.
15. Keluarga besar Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (Himatem).
16. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin angkatan 2019 Universitas Lampung.
17. Dan untuk seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini.
18. Penulis yang telah banyak memberikan waktu sehingga selesainya penulisan laporan ini.

Penulis menyadari dalam penyajian Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran membangun sangat diharapkan guna perbaikan kedepannya. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 20 Maret 2024
Penulis,

Fadhlan 'Azhim
NPM. 1915021029

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	iv
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7

2.1	Biomassa.....	7
2.2	Pelepah Kelapa Sawit (<i>Elaeis guineensis Jacq</i>)	8
2.3	Karakteristik Bahan Bakar Padat	10
2.3.1	Nilai Kalor	11
2.3.2	Analisis <i>Proximate</i>	11
2.3.3	Analisis <i>Ultimate</i>	12
2.3.4	Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat.....	13
2.4	Torefaksi	15
2.4.1	Keuntungan Torefaksi.....	15
2.4.2	Mekanisme Torefaksi.....	16
2.2.3	Parameter Torefaksi	17
2.4.4	Kuantitas Produk Torefaksi	18
2.4.5	Jenis-jenis Torefaksi	20
2.4.6	Reaktor Torefaksi Tipe Tubular.....	21
BAB III METODE PENELITIAN		23
3.1	Alat dan Bahan.....	23
3.2	Pelaksanaan Penelitian.....	26
3.3	Prosedur Pengujian Torefaksi	27
3.4	Parameter Penelitian	27
3.5	Tahapan Penelitian.....	28
3.6	Tempat dan Waktu Penelitian.....	29
3.6.1	Tempat Penelitian	29
3.6.2	Waktu Penelitian.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		30
4.1	Tampak Visual Produk.....	30
4.2	Nilai Kalor	32
4.3	Hasil <i>Analysis Proximate</i>	33
4.4	Hasil <i>Analysis Ultimate</i>	35

4.5	<i>Mass Yield dan Energy Yield</i>	36
4.6	<i>Energy Density</i>	37
4.7	Rasio O/C dan H/C	38
4.8	Pengaruh ukuran sampel pelepah sawit hasil torefaksi	39
BAB V PENUTUP		41
5.1.	Kesimpulan	41
5.2.	Saran	41
DAFTAR PUSTAKA		43
LAMPIRAN		46

DAFTAR TABEL

Tabel:	Halaman
2.1 Kandungan Nutrisi Kelapa Sawit (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.).....	10
2.2 Kandungan Kelapa Sawit (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.).....	10
2.3 Metode Penyajian dari Karakteristik Bahan Bakar Padat.	14
3.1.Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular	25
3.2 Rancangan Penelitian Torefaksi Pelepah Sawit	27
3.3 Rancangan Penelitian Hasil Pengujian.....	28
3.4 Rencana Jadwal Kegiatan Penelitian.....	39
4.1 Rasio O/C dan Rasio H/C.....	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar:	Halaman
2.1 Fisikokimia biomassa saat torefaksi.....	17
2.2 Reaktor Tipe Tubular Jenis <i>Screw Reactor</i>	22
3.1 Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular.....	24
3.2 12 <i>Channel Temperature Recorder Datalogger</i>	24
3.3 Sampel Mentah Pelepah Sawit (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>).....	26
3.4 Diagram alur penelitian	32
4.1 Tampak visual biomassa pelepah sawit mentah dan sudah ditorefaksi dengan variasi ukuran.....	17
4.2 Grafik nilai kalor produk torefaksi pelepah sawit.....	17
4.3 Plot klasifikas nilai kalor pada torefaksi pelepah sawit	17
4.4 Grafik hasil <i>proximate</i> produk torefaksi pelepah sawit	17
4.5 Grafik uji <i>ultimate</i> produk torefaksi pelepah sawit.....	17
4.6 Grafik perolehan <i>mass yield</i> dan <i>energy yield</i>	17
4.7 Grafik <i>Energi Density</i> sampel pelepah sawit	17

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran:	Halaman
1. Hasil Pengolahan Data	51
a. Nilai <i>Mass Yield</i>	51
b. Nilai <i>Energy Yield</i>	51
c. Nilai <i>Energy Density</i>	52
d. Nilai Rasio O/C dan H/C	52
2. Sampel Pelepah Sawit	55
3. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular	56
4. Hasil Pengujian Laboratorium	57
a. Data Nilai Kalor Pelepah Sawit Mentah	57
b. Data Nilai Kalor Produk Torefaksti 275°C	58
c. Data Analisis <i>Proximate</i> Pelepah Sawit Mentah.....	60
d. Data Analisis <i>Proximate</i> Produk Torefaksi 275°C	61
e. Data Analisis <i>Ultimate</i> Produk Torefaksi 275°C	64

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan sumber energi terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dunia. Termasuk kebutuhan akan sumber tenaga listrik. Penggunaan energi listrik yang semakin meningkat, tidak hanya untuk penerangan, namun penggunaan energi listrik juga meluas ke berbagai daerah. Sementara sumber energi utama, energi fosil, terus menurun. Krisis energi konvensional, dengan bahan bakar fosil sebagai sumber bahan bakar utama, telah terjadi dan akan semakin parah di masa depan. Oleh karena itu, bahan bakar alternatif yang terbarukan (*renewable*), ramah lingkungan dan juga bernilai ekonomi harus terus dicari dan diterapkan (Papilo, 2012).

Penggunaan energi terbarukan (EBT) ini sejalan dengan komitmen pemerintah untuk mengurangi emisi karbon yang oleh masyarakat disebut pemanasan *global*, atau sering disebut *global warming*. Pemanasan *global* adalah peristiwa di mana suhu permukaan bumi meningkat akibat emisi karbondioksida dan gas rumah kaca. Sumber energi baru dan terbarukan yang mulai digunakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi primer berbahan bakar fosil dan pengaruh dampak buruk bagi lingkungan adalah penggunaan energi dari biomassa. Energi biomassa (biogas, bioethanol dan biodiesel) sudah banyak digunakan termasuk dalam ketenagalistrikan dan penggunaan Bahan Bakar Nabati yang akan menggantikan peran batubara, minyak bumi dan gas bumi (Arhamsyah, 2010).

Salah satu langkah penting yang dilakukan oleh Pemerintah Indonesia adalah dengan meratifikasi *Paris Agreement to the United Nation Framework Convention on Climate Change* (Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim). Dalam pertemuan tersebut, Indonesia bersama dengan negara-negara di dunia membuat komitmen untuk menahan kenaikan temperatur rata-rata global dibawah 2°C dan menekan kenaikan temperatur rata-rata global ke angka 1,5°C di atas tingkat pra-industrialisasi. Upaya dari perjanjian Paris ini dikerucutkan pada program *Net Zero Emission* (NZE) atau nol bersih emisi.

Net zero emissions atau nol emisi karbon adalah kondisi dimana jumlah emisikarbon yang dilepaskan ke atmosfer tidak melebihi jumlah emisi yang mampu diserap oleh bumi. Dalam prosesnya diperlukan sebuah transisi dari sistem energi yang digunakan sekarang ke sistem energi bersih guna mencapai kondisiseimbang antara aktivitas manusia dengan keseimbangan alam. Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam prosesnya adalah mengurangi jumlah karbon atau gas emisi yang dihasilkan dari berbagai kegiatan (aktivitas) manusia pada kurun waktu tertentu, atau lebih sering dikenal dengan jejak karbon. Jejak karbon yang kita hasilkan akan berdampak negatif bagi kehidupan kita di bumi, seperti kekeringan dan berkurangnya sumber air bersih, timbul cuaca ekstrim dan bencana alam, perubahan produksi rantai makanan, dan berbagai kerusakan alam lainnya.

Program NZE ini mengharuskan negara industri dan negara maju untuk mencapai *net zero emission* pada tahun 2050. Adanya program NZE menimbulkan adanya regulasi baru di berbagai negara yang terkait dengan penyediaan energi listrik menggunakan pembangkit listrik konvensional. Pembangkit Listrik konvensional yang menggunakan batubara seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menjadi fokus utama dalam regulasi baru yang disesuaikan dengan program NZE. Hal ini karena PLTU menjadi penghasil emisi CO₂ terbesar akibat

pengoperasiannya sebagai pembangkit *base load* di berbagai negara, termasuk Indonesia (Rahma dan Imzastini, 2021).

Tujuan utama pemerintah Indonesia dalam mengurangi emisi karbon adalah dengan mengurangi penggunaan pembangkit listrik berbasis fosil dengan memperluas penggunaan teknologi *co-firing* di PLTU. Hal ini menjadi bukti keseriusan pemerintah sebagai upaya menekan emisi karbon dan mempercepat pemenuhan bauran energi baru terbarukan (EBT) 23% pada tahun 2025. *Co-firing* sendiri merupakan proses penambahan biomassa sebagai pengganti parsial atau bahan campuran batu bara di PLTU. *Co-firing* merupakan teknik substitusi dalam pembakaran Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), di mana sebagian batubara yang dijadikan bahan bakar diganti dengan bahan lainnya, dalam konteks ini adalah biomassa. Teknik ini diklaim dapat mengurangi ketergantungan energi Indonesia dari sumber energi konvensional, yaitu batu bara. Indonesia pada dasarnya merupakan negara dengan kekayaan sumber energi terbarukan yang melimpah dan potensial, tetapi pengembangannya yang masih belum optimal. Salah satu dari potensi sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang nilainya melimpah adalah biomassa. Potensi biomassa di Indonesia memiliki angka yang sangat besar sebesar 146,7 juta ton per tahunnya (Parinduri, 2020).

Biomassa sendiri ialah bahan organik yang berasal dari proses fotosintesis, baik berupa produk maupun sisa dari pemakaian. Contoh dari biomassa ialah kayu, tanaman, sisa hasil pertanian, sisa hasil hutan, dan kotoran ternak. Selain digunakan sebagai bahan pangan, bahan bangunan, dan lain sebagainya, biomassa juga dimanfaatkan sebagai bahan bakar pengganti energi fosil. Biomassa yang biasa digunakan sebagai sumber energi ialah yang memiliki nilai ekonomis rendah atau sisa dari produk primer. Di antara banyak kelebihan sumber energi biomassa, salah satunya ialah dapat menjadi sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga dapat menjadi sumber energi secara berkelanjutan (*sustainable*).

Indonesia merupakan negara dengan angka produksi dan eksportir biomassa kelapa sawit terbesar di dunia, hal ini juga mengakibatkan limbah dari biomassa kelapa sawit melimpah. Pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai kompos dan pakan ternak tidak akan memiliki nilai ekonomi yang baik. Pemanfaatan pelepah kelapa sawit akan memiliki nilai ekonomi yang bertambah apabila dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan karena pelepah sawit memiliki potensi energi sebesar $\pm 1,3$ TJ per tahunnya (Susanty dkk., 2016).

Dalam satu hektar perkebunan sawit dapat diperkirakan menghasilkan 6400 - 7500 pelepah per tahunnya dengan nilai kalor dari biomassa pelepah sawit sekitar 17200 kJ/kg (Susilowati dkk., 2017). Potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif menjadi salah satu proses untuk mendapatkan sumber energi alternatif adalah dengan proses torefaksi. Torefaksi adalah suatu proses pengolahan biomassa dengan rentang suhu 200-300°C. Pada suhu ini akan terjadi proses pelepasan hemiselulosa dan zat-zat volatil, sehingga kadar O/C dan H/C akan berkurang. Pengurangan dari kadar O/C dan H/C ini akan meningkatkan *mass yield* dan *energy yield*. Adapun tujuan dari proses torefaksi ini adalah untuk meningkatkan nilai kalor dan memaksimalkan nilai *mass yield* dan *energy yield* (Basu, 2013). Torefaksi adalah salah satu dari proses termokimia yang saat ini banyak digunakan dalam meningkatkan nilai kalor dari biomassa dan untuk menutupi kekurangan dari biomassa seperti rendahnya nilai kalor dan densitas energi, efisiensi pembakaran rendah, kelembaman tinggi, dan energi dari penggilingan yang tinggi (Gde Suastika, 2019).

Torefaksi sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Susanty dkk. (2016) mendapatkan nilai kalor dari hasil proses torefaksi pelepah sawit dapat meningkat sebesar 17% dari nilai kalor sebelum dilakukan proses torefaksi. Nilai kalor bahan baku meningkat dari 16.800 kJ/kg menjadi sebesar 17.700 – 19.600 kJ/kg setelah proses torefaksi. Nilai kalor meningkat dengan bertambahnya

suhu torefaksi. Proses torefaksi *food waste* pada suhu sekitar 250-350°C selama kurang lebih 10-50 menit menghasilkan nilai kalor yang turun dibawah 50 menit. Sedangkan untuk nilai kalor menurun pada waktu 50 menit (Poudel dkk., 2015). Jenis penggunaan *carrier gas* juga akan mempengaruhi hasil dari nilai kalor proses torefaksi. Penelitian torefaksi pelepah sawit ini saya lakukan dengan menggunakan variasi ukuran sampel dan menggunakan sistem pemanas *oil jacket*. Dengan waktu tinggal yang diberikan sebesar 30 menit yang belum pernah dilakukan sebelumnya dengan tujuan untuk mengetahui kondisi proses torefaksi terhadap nilai kalor dari produk torefaksi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas, disimpulkan bahwa pokok permasalahan yang menjadi fokus penelitian ini adalah “*apa saja karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi dari sampel pelepah mentah?*”

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian torefaksi pelepah sawit ini adalah untuk mengetahui karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi dari pelepah sawit variasi ukuran sampel pada suhu 275 °C berupa nilai kalor, *proximate analysis*, *ultimate analysis*, *mass yield* dan *energy yield*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini terdapat batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Sampel-sampel biomassa memiliki ukuran yang tidak seragam.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor torefaksi tipe *tubular system oil jacket* dengan sumber pemanas LPG.
3. Variasi bentuk torefaksi dilakukan dengan 3 bentuk yaitu berbentuk cacah berukuran 1x1 cm dan bentuk balok berukuran 1x2 cm, dan serbuk berukuran 100 mesh.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika Penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah, tujuan yang menjelaskan alasan diadakannya penelitian ini, batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini agar hasil penelitian lebih terarah, serta sistematika penulisan berupa format yang dipakai pada penulisan laporan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisikan landasan teori yang menunjang pada penelitian dan merupakan teori-teori dasar yang meliputi: penjelasan tentang biomassa, jenis-jenis sampel kayu biomassa, torefaksi, reaktor torefaksi tipe tubular, dan karakteristik dari bahan bakar padat.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab III berisi tempat dan waktu penelitian yang akan dilakukan serta alur tahapan pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil proses torefaksi dan pembahasan analisis data-data yang telah didapatkan saat maupun setelah pengujian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan tentang kesimpulan dan saran yang dapat diambil atau diberikan atas hasil penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa merupakan istilah untuk semua bahan organik yang berasal dari tanaman (termasuk alga, pohon dan tanaman). Biomassa diproduksi oleh tanaman hijau yang mengalami proses fotosintesis. Sumber daya biomassa dapat dianggap sebagai materi organik, dimana energi sinar matahari yang disimpan dalam ikatan kimia. Ketika ikatan antara berdekatan molekul karbon, hidrogen dan oksigen dipecah oleh pencernaan, pembakaran, atau penguraian, zat-zat ini melepaskan energi kimiawi yang tersimpan. Biomassa selalu menjadi sumber energi utama bagi umat manusia dan saat ini diperkirakan berkontribusi dari urutan 10–14% pasokan energi dunia. (McKendry, 2002).

Biomassa sendiri ialah bahan yang diperoleh dari tanaman secara langsung maupun tidak langsung, yang dapat dimanfaatkan sebagai energi atau bahan bakar dalam jumlah yang besar. Biomassa atau yang dikenal sebagai (*pytomass*) dapat diartikan sebagai *biosource* atau sumber daya yang berasal dari sumber daya hayati. Sumber daya ini meliputi ratusan maupun ribuan spesies tanaman yang ada di daratan maupun di lautan, sumber perhutanan, pertanian, sisa pembuangan dari proses industri, hingga kotoran hewan (Rachman dkk., 2018).

Selain penggunaan biomassa untuk tujuan primer serat, pakan ternak, bahan pangan, bahan bangunan, minyak nabati, dan sebagainya. Biomassa juga dimanfaatkan sebagai sumber energi (bahan bakar), yang

digunakan adalah bahan bakar biomassa yang bernilai ekonomisnya cukup rendah dan juga merupakan limbah yang diambil produk primernya (Parinduri, 2020). Biomassa yang biasa dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik ialah biomassa tanaman dan kayu. Biomassa yang dihasilkan dari hasil industri kelapa sawit antara lain tandan kosong, cangkang kelapa sawit, serat mesokarp, daun pelepah sawit dan batang pohon kelapa sawit. Biomassa tersusun atas beberapa komponen yaitu kandungan air (*moisture content*), zat volatil (*volatile matter*), karbon tetap (*Fixed Carbon*), dan abu (*ash*). Parameter penting lainnya dalam karakteristik biomassa adalah nilai kalor. Nilai kalor sangat bergantung pada komposisi dari biomassa tersebut, semakin tinggi kandungan karbon terikat maka semakin tinggi pula nilai kalornya. Nilai kalor biomassa merupakan salah satu parameter dari pemilihan biomassa ketika digunakan dalam pembangkit listrik sebagai bahan bakar primer maupun bahan bakar sekunder untuk batubara (Sidabutar, 2018).

Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa seiring kenaikan harga bahan bakar fosil dalam beberapa dekade mendatang, energi dari biomassa akan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pasokan sumber energi secara keseluruhan. Ketika biomassa digunakan sebagai sumber energi, dapat dikatakan bahwa biomassa tidak meningkatkan emisi gas rumah kaca karena merupakan sumber energi dengan emisi CO₂ bersih atau nol. Ini juga berarti bahwa biomassa adalah netral karbon.

2.2 Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq*)

Kelapa sawit (*Elaeis guenensis jacq.*) yaitu tumbuhan industri penghasil minyak industri, minyak sawit, ataupun bahan bakar (biodiesel). Produksi dari kelapa sawit menghasilkan keuntungan besar sehingga banyak kawasan hutan dan areal perkebunan diubah menjadi perkebunan kelapa sawit. Indonesia adalah penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia.

Perkebunan kelapa sawit menghasilkan sisa dari hasil produksi yang belum dimanfaatkan secara optimal, sisa dari hasil produksi yang dihasilkan oleh perkebunan kelapa sawit ada tiga macam yaitu limbah padat, limbah cair dan gas. Salah satu dari pemanfaatan limbah padat kelapa sawit adalah dengan memanfaatkannya menjadi sumber energi terbarukan (EBT) atau sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil seperti pemanfaatan pelepah kelapa sawit sebagai pembuatan bahan bakar padat dengan proses torefaksi sebagai pengganti batubara. dan sisa pengolahan buah sawit sangat potensial menjadi bahan campuran makanan ternak.(Yusuf dkk., 2014).

Pada umumnya limbah kelapa sawit dibiarkan hingga membusuk dengan sendirinya tanpa ada perlakuan pengolahan lebih lanjut. Jumlah pelepah sawit yang diproduksi dapat mencapai 40 - 50 pelepah per tahunnya dengan berat pelepah sebesar 4,5 kg untuk berat kering per pelepah. Dalam satu hektar perkebunan sawit dapat diperkirakan menghasilkan 6400 - 7500 pelepah per tahunnya dengan nilai kalor biomassa pelepah sawit sebesar 17200 kJ/kg (Susilowati dkk., 2017).

Untuk meningkatkan nilai jual dari pelepah sawit, maka pelepah sawit diproses agar membuat nilai pelepah sawit menjadi tinggi, dibandingkan dengan nilai kalor pelepah sawit mentah sehingga dapat bersaing dengan bahan bakar lainnya.

Sampel Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) memiliki komposisi kimia dalam bentuk mentah pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kandungan nutrisi kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*)

Zat Nutrisi				
Berat Kering (%)	Protein Kasar (%)	Lemak Kasar (%)	Serat Kasar (%)	<i>Gross Energy</i> (K.Cal/g)
80,56	5,8	3,8	9,98	1,54

Sumber: (Junjungan dkk., 2015)

Tabel 2.2 Kandungan pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.).

Unsur Kimiawi	Pelepah Kelapa Sawit (%)
Selulosa	33,7
Hemiselulosa	35,9
Lignin	17,4
Silika	2,6
Abu	3,3
Nitrogen	2,38
Kalium	1,316
Kalsium	2,568
Magnesium	0,487
Posfor	0,157
Sulfur	0,40
Klorida	0,70

Sumber: (Elisabeth dan Ginting, 2013)

Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.2. Kandungan hemiselulosa yang tinggi pada pelepah sawit membuatnya sulit untuk diproses dan kehilangan energi saat dibakar. Dengan memperlakukan proses torefaksi pada pelepah sawit, kandungan hemiselulosa harus dikurangi. Selama proses torefaksi, hemiselulosa terurai lebih cepat daripada selulosa dan lignin.

2.3 Karakteristik Bahan Bakar Padat

Parameter standar untuk karakteristik bahan bakar padat adalah parameter komponen berdasarkan komposisi batubara. Dua jenis analisis digunakan untuk menentukan komposisi batubara digunakan dua jenis analisis yaitu *proximate analysis* dan *ultimate analysis*.

2.3.1 Nilai Kalor

Nilai kalor bahan bakar adalah jumlah panas yang dilepaskan ketika bahan bakar padat terbakar. Nilai kalor terdiri dari *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV dapat didefinisikan sebagai panas yang dilepaskan oleh satuan massa ataupun volume bahan bakar pada suhu awal sebesar 25°C setelah dibakar habis dan sisa pembakaran kembali ke suhu awal sebesar 25°C. Panas ini juga termasuk panas laten dari penguapan air. HHV ini juga dapat dikenal dengan nilai kalori total. LHV dapat didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan dengan pembakaran total pada jumlah tertentu. LHV ini juga berbeda dengan HHV karena proses pembakarannya tidak memerlukan panas laten dari penguapan air. LHV juga disebut sebagai nilai kalor bersih atau *Nett Calorific Value*. Nilai kalor bahan bakar padat dari produk torefaksi mengacu pada standar klasifikasi dari batubara berdasarkan standar ASTM D-388 (Basu, 2013).

2.3.2 Analisis *Proximate*

Analisis *proximate* merupakan salah satu analisis yang digunakan untuk mengetahui komposisi bahan bakar padat seperti nilai kandungan karbon tetap, kandungan volatil, kandungan air, dan abu.

- a. Karbon Tetap (*Fixed Carbon*) adalah karbon tetap yang terbentuk setelah volatil dilepaskan. Karbon ini juga berbeda dengan karbon lainnya karena terdapat unsur karbon yang menghilang selama proses penguapan dan membentuk ikatan hidrokarbon dengan zat volatil. Karbon tetap berkontribusi secara signifikan terhadap nilai kalor bahan bakar padat.

- b. Zat Volatil (*Volatile Matter*) adalah konstituen bahan bakar padat selain air yang dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan dalam kondisi inert atau tanpa oksigen. Volatil ini adalah hidrokarbon siklik, alifatik, dan aromatik. Zat yang mudah menguap menghasilkan panas selama proses pembakaran, tetapi tidak sebanyak karbon padat.
- c. Kandungan air (*Moisture Content*) dalam bahan bakar padat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *surface moisture* dan *inherent moisture*. *Surface moisture* merupakan kandungan air atau tingkat kelembapan pada bagian permukaan dari bahan bakar padat, sedangkan *inherent moisture* merupakan kandungan air atau tingkat kelembapan pada pori-pori bahan bakar padat. *Surface moisture* lebih mudah untuk dihilangkan dibandingkan dengan *inherent moisture*. Gabungan dari kedua jenis kandungan air ini disebut dengan *total moisture*.
- d. Abu (*Ash*) adalah penyusun mineral dalam bahan bakar padat berupa unsur dan oksida. Mineral dalam abu termasuk silika, natrium, magnesium, dan oksida.

2.3.3 Analisis Ultimate

Analisis *ultiimate* merupakan salah satu analisis yang digunakan untuk mengetahui parameter komposisi bahan bakar padat seperti kandungan karbon, kandungan hidrogen, kandungan nitrogen, kandungan oksigen, dan sulfur total (Aulia dkk., 2021).

- a. Dengan meningkatnya kandungan batubara, jumlah karbon, yang merupakan jumlah karbon yang terkandung dalam Batubara, yang meningkat seiring dengan meningkatnya tingkatannya. Kandungan karbon meningkat sekitar 60-100% seiring dengan peningkatan kandungan batubara.

- b. Nilai hidrogen, kandungan hidrogen dalam batubara terdiri atas campuran antara alifatik dan aromatik dan secara bertahap berkurang seiring dengan evolusi dari metana.
- c. Nilai oksigen, oksigen yang terkandung dalam batubara berupa ikatan hidroksil, metoksil, dan juga karbonit, yang merupakan oksigen tidak reaktif.
- d. Nilai nitrogen, nitrogen yang terkandung dalam batubara berada dalam bentuk senyawa organik. Hampir semua nitrogen yang dihasilkan berasal dari protein dalam bahan tanaman asli. Kandungan nitrogen sekitar 0,5 hingga 3,0%. Batubara keras biasanya mengandung lebih banyak nitrogen daripada lignit atau antrasit.
- e. Nilai sulfur, Sulfur umumnya terdapat dalam jumlah kecil di dalam batubara dan diduga berasal dari tumbuhan penghasil protein dan juga dipekatkan oleh bakteri belerang.

2.3.4 Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat

Metode penyajian untuk menggambarkan sifat bahan bakar padat dan batubara memiliki penyajian yang berbeda-beda. Sehingga untuk dapat membandingkannya, kita membutuhkan referensi dengan kondisi yang sama. Berikut cara mengkarakterisasi bahan bakar padat pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Metode penyajian dari karakteristik bahan bakar padat.

a. <i>As received</i> (ar)	Metode <i>as received</i> mengacu pada pemanfaat langsung pada pembakaran. Kandungan batubara tersebut diasumsikan seluruh kandungan batubara.
b. <i>Air dried basis</i> (adb)	Metode <i>air dried basis</i> (adb) menunjukkan komposisi batubara tanpa kandungan surface moisture.
c. <i>Dry basis</i> (db)	Metode <i>dry basis</i> (db) menunjukkan kandungan batubara tanpa kandungan air atau total moisture.
d. <i>Dry, ash-free</i> (daf)	Metode <i>dry, ash-free</i> (daf) menunjukkan batubara tanpa air dan abu.
e. <i>Dry, mineral-matterfree</i> (dmmf)	Metode <i>dry, mineral-matter free</i> (dmmf) mengasumsikan kandungan batubara hanya komponen organik tanpa adanya air, abu, dan mineral.
f. <i>Moist, ash-free</i> (maf)	Metode <i>moist, ash-free</i> (maf) menunjukkan batubara tanpa abu, tapi masih mengandung air sedikit.
g. <i>Moist, mineral-matterfree</i>	Metode <i>Moist, mineral-matter free</i> ini menunjukkan karakteristik batubara tanpa abu dan mineral, tapi masih mengandung air.

2.4 Torefaksi

Torefaksi merupakan proses perlakuan panas pada suhu antara 200-300°C dibawah tekanan atmosfer tanpa ada oksigen (*inert*) guna menghasilkan produk akhir dengan nilai kalor setara dengan batubara sub-bituminus B menurut kualifikasi standard ASTM D 388 (Amrul dkk., 2013). Peningkatan suhu torefaksi menyebabkan dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa yang menyebabkan gas *volatile* mengalami peningkatan. Penambahan zat *volatile* diawali dengan terdekomposisinya hemiselulosa dilanjutkan dengan lignin dan diakhiri oleh selulosa yang terdekomposisi.

Pada proses torefaksi, kandungan karbon akan meningkat dan kandungan zat-zat volatil akan menurun sehingga meningkatkan kualitas dari batubara. Keuntungan lain dari proses torefaksi adalah kadar air dari produk semakin berkurang dan menjadikannya semakin sulit menyerap air (hidrofobik). Secara umum, kualitas, densitas energi dan hidrofobitas dari produk torefaksi akan mengalami peningkatan (Wenas dan Hardianto, 2021).

2.4.1 Keuntungan Torefaksi

Keuntungan dari proses torefaksi yaitu untuk mengurangi zat volatil yang tidak dibutuhkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Produk yang ditorefaksi akan memiliki kandungan oksigen yang lebih rendah, menghasilkan rasio oksigen terhadap karbon sehingga biomassa memiliki sifat yang mirip dengan batubara. Salah satu parameter penting dalam menggunakan biomassa sebagai bahan bakar adalah kemudahan penghancuran (*grindability*). Torefaksi juga dapat dilakukan pada berbagai jenis biomassa seperti jerami, kayu, daun kelapa sawit, dan tandan kelapa sawit. Kualitas produk torefaksi ditentukan terutama oleh nilai dari karakteristik biomassa, suhu dan lama proses torefaksi. Semakin lama proses torefaksi,

semakin banyak komponen energi yang hilang sehingga kandungan energinya akan berkurang (Irawan *et al.*, 2015).

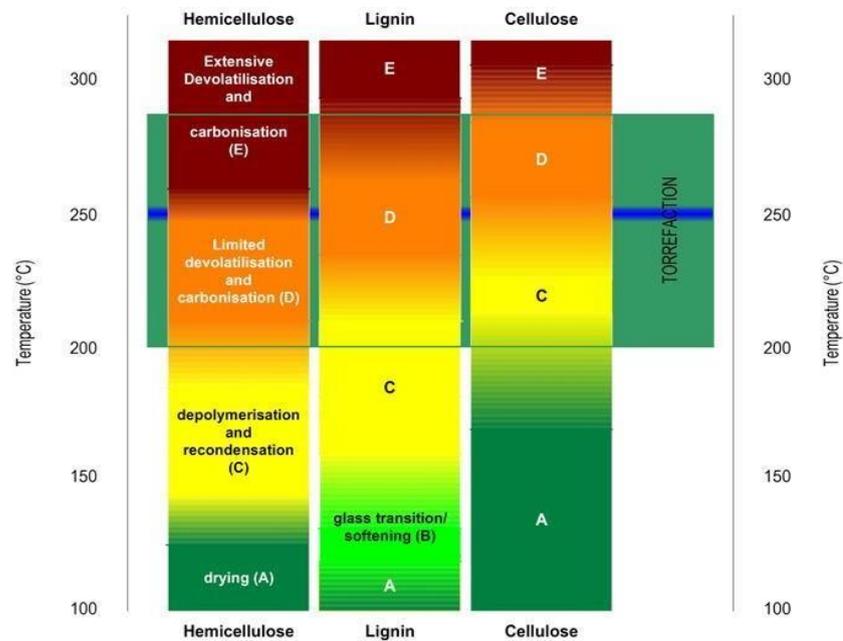
2.4.2 Mekanisme Torefaksi

Proses awal dari torefaksi dimulai dengan tahap pemanasan untuk mengurangi kadar air yang terdapat pada permukaan biomassa. Air ini dilepaskan dari ikatannya melalui reaksi kimia yang disebut *inherent moisture*, yang terjadi pada suhu 160°C. Pada suhu 180-270°C, reaksi eksotermik terjadi dan menyebabkan mulai terdekomposisinya hemiselulosa. Proses dekomposisi ini merusak ikatan rantai pada polimer hemiselulosa, termasuk gugus hidroksil (-OH) dan beberapa gugus lainnya. Akibatnya, biomassa mengalami perubahan warna dan melepaskan air, CO₂, asam asetat, fenol, serta zat volatile lainnya. Ketika suhu mencapai di atas 280°C, produksi CO₂, asam asetat, fenol, dan hidrokarbon meningkat, sehingga keseluruhan proses menjadi eksotermik. Pada akhir proses torefaksi, hasilnya adalah padatan dengan struktur polimer yang lebih pendek dan sederhana daripada sebelumnya sebelum melalui proses torefaksi (Apriyanto dkk., 2019).

Tujuan torefaksi adalah untuk menghilangkan bahan-bahan volatile dan mengkarbonisasi polimer biomassa pada suhu 200-300°C. Namun, dekomposisi polimer biomassa tidak selalu terjadi sepenuhnya pada suhu torefaksi 200-300°C. Setiap jenis polimer mengalami dekomposisi pada suhu yang berbeda, dan berikut adalah rentang suhu dekomposisi untuk polimer biomassa:

1. Hemicellulose: 225-300°C
2. Cellulose: 305-375°C
3. Lignin: 250-500°C

Perubahan termokimia biomassa saat torefaksi terbagi menjadi lima tahapan yang dijelaskan pada Gambar 2.1 yaitu sebagai berikut.



Gambar 2.1 Fisikokimia biomassa saat torefaksi (Basu, 2013).

2.2.3 Parameter Torefaksi

Ada beberapa parameter yang dapat memengaruhi proses torefaksi di antaranya adalah sebagai berikut.

- Suhu, suhu merupakan faktor terpenting dalam proses torefaksi karena mengatur tingkat degradasi termal biomassa. Suhu yang lebih tinggi akan menghasilkan massa dan energi yang lebih rendah, namun produk akan memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi. Saat suhu torefaksi meningkat, fraksi karbon tetap dalam sampel meningkat, sementara kandungan hidrogen dan oksigen akan menurun.
- Laju Pemanasan dan Residence Time: Kecepatan pemanasan biomassa mempengaruhi berapa lama biomassa dipanaskan, yang dikenal sebagai "residence time". Residence time yang lebih lama akan menghasilkan massa yang lebih rendah dan

kepadatan energi yang lebih tinggi. Berbeda dengan suhu, residence time tidak memiliki pengaruh yang dominan pada produk torefaksi.

- c. Jenis Biomassa: Parameter lain yang mempengaruhi hasil torefaksi adalah jenis biomassa. Kandungan hemiselulosa pada kayu dapat berbeda tergantung pada jenis kayu, seperti kayu keras dan kayu lunak. Kayu keras akan melepaskan lebih banyak asam asetat dan air, sementara kayu lunak akan melepaskan lebih banyak asam format selama proses torefaksi. Hal ini disebabkan karena jenis kayu keras mengalami penurunan massa yang lebih tinggi selama torefaksi tanpa signifikan mempengaruhi kehilangan energi dibandingkan dengan kayu lunak.
- d. Ukuran Sampel: Ukuran partikel atau potongan biomassa juga mempengaruhi hasil torefaksi. Efek ini khususnya terlihat pada ukuran partikel yang lebih besar. Ukuran dan bentuk partikel serta ukuran sampel biomassa akan mempengaruhi laju transfer panas dari luar hingga ke dalam biomassa. Jika suhu dan *residence time* sama pada proses torefaksi, biomassa dengan ukuran lebih kecil akan mengalami dekomposisi termal lebih mudah dibandingkan dengan biomassa yang lebih besar (Irawan dkk., 2015).

2.4.4 Kuantitas Produk Torefaksi

Hasil dari proses torefaksi adalah berupa padatan (*char*) dan sebagian gas. Menurut Tumuluru pada tahun 2010, idealnya produk torefaksi dari biomassa kayu seharusnya menghasilkan 82% berat produk padatan (*char*). Beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa selain padatan dan gas, juga terdapat tar sebagai hasil dari proses torefaksi. Tar adalah cairan yang muncul akibat kondensasi gas hasil pirolisis biomassa karena adanya perbedaan suhu yang tinggi (Suwandono, 2015).

Namun, kualitas produk torefaksi tidak hanya dinilai berdasarkan berkurangnya massa produk torefaksi, karena pengurangan massa belum tentu berarti meningkatkan kepadatan energi. Pengurangan massa yang terlalu ekstrim bahkan dapat menurunkan kepadatan energi dari produk torefaksi. Kualitas produk torefaksi diidentifikasi berdasarkan beberapa parameter, seperti yang telah dijelaskan oleh Basu pada tahun 2013:

- a. *Mass yield* (MY) adalah fraksi massa dari biomassa awal yang masih tersisa setelah melalui proses torefaksi. MY dihitung dengan memperhatikan dua faktor, yaitu kehilangan massa karena pengeringan dan kehilangan massa karena torefaksi itu sendiri. *Mass yield* akibat torefaksi mengindikasikan seberapa besar fraksi dari komponen organik asli biomassa yang telah berubah menjadi arang, dan perhitungannya harus dilakukan dalam kondisi "dry ash free" (daf). Namun, jika produk torefaksi berasal dari biomassa dengan kandungan anorganik yang tinggi, termasuk abu, maka perhitungannya harus dalam kondisi "*dry base*" (db) yang mencakup total padatan tersebut. Selain dua kondisi tersebut, ada juga kondisi lain yang dapat digunakan untuk menentukan keadaan material secara keseluruhan, yaitu "as-received" (ar).

$$MY_{daf} = \frac{mf_{daf}}{m_o} \dots \dots \dots (1)$$

$$MY_{db} = \frac{mf_{db}}{m_o} \dots \dots \dots (2)$$

$$MY_{ar} = \frac{mf_{far}}{m_o} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

MY_{daf} : *Mass yield* "dry ash free "

MY_{db} : *Mass yield* "dry based " MY_{ar} : *Mass yield* "as-received "

mf_{daf} : Massa total biomassa tertorefaksi “*dry ash free*”

mf_{db} : Massa total biomassa tertorefaksi “*dry based*”

mf_{ar} : Massa total biomassa tertorefaksi “*as-received*”

mo : Massa total biomassa mentah.

- b. Nilai kalor adalah salah satu parameter penting dari produk torefaksi. Parameter ini menggambarkan jumlah energi yang dilepaskan ketika satuan massa produk dibakar. Energy density juga sering disebut sebagai nilai kalor.

Nilai Kalor = jumlah energi yang dilepaskan satuan
 massa dari biomassa tertorefaksi
 sepenuhnya terbakar
 = HHV

- c. *Energy yield* (EY) merupakan fraksi energi dalam biomassa produk torefaksi. *Energy yield* menentukan komponen energi yang tetap berada dalam biomassa setelah komponen tanpa hilang selama torefaksi. *Energy yield* memberikan nilai kuantitatif dari energi pada biomassa setelah torefaksi, didefinisikan sebagai:

$$Energy\ yield\ (EY) = \frac{E_{torrefied\ product}}{E_{raw\ biomass}} \quad \dots (4)$$

Energy yield dapat dihitung dalam bentuk nilai kalor biomassasebelum dan sesudah torefaksi:

$$EY = MY \times \frac{HHV_f}{HHV_o} \quad \dots (5)$$

2.4.5 Jenis-jenis Torefaksi

Dalam beberapa waktu terakhir, penelitian mengenai torefaksi telah mengalami perkembangan yang pesat, yang turut menciptakan berbagai jenis reaktor torefaksi. Di bawah ini akan dijelaskan beberapa tipe reaktor torefaksi yang berbeda.

1. Reaktor tipe *fixed bed* memiliki karakteristik dengan laju

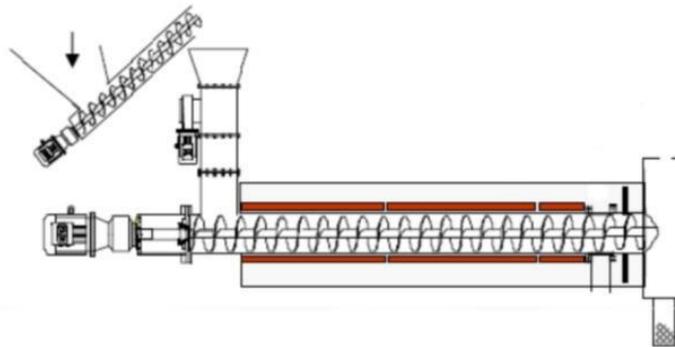
pemanasan yang rendah, yang mengakibatkan koefisien perpindahan panas yang terjadi menjadi rendah. Reaktor fixed bed umumnya digunakan untuk melakukan identifikasi terhadap parameter-parameter yang mempengaruhi kandungan produk yang akan mengalami proses torefaksi. Reaktor tipe *fluidized bed*, reaktor ini menggunakan tingkat pemanasan yang tinggi. Reaktor tipe ini umumnya digunakan untuk menganalisis pengaruh temperatur serta waktu tinggal (*residence time*) biomassa di dalam reaktor pada saat proses torefaksi berlangsung.

2. Reaktor tipe *rotary kiln* memiliki keunikan dimana tempat pembakarannya (kiln) berputar dengan kecepatan yang lambat, sehingga menciptakan pencampuran material yang sangat baik dalam reaktor. Kelebihan dari reaktor ini adalah tingkat pemanasan yang tidak lebih dari 100°C per menit dan *residence time* hingga mencapai satu jam.
3. Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* merupakan metode torefaksi yang melibatkan struktur pengering dengan banyak elemen, seperti *burner*, *combustion chamber*, *feeder*, *cyclone*, *multy stage dry condenser*, *ID fan (suction flow)*, dan *control panel*. Proses torefaksi ini diklaim mampu dilakukan dengan cepat, hanya memerlukan waktu 3-5 menit, dan memiliki kapasitas produksi sebesar 20 kg per jam (Sulistio dkk., 2020).

2.4.6 Reaktor Torefaksi Tipe Tubular

Reaktor tipe tabung merupakan jenis reaktor dengan bentuk berupa tabung yang memiliki dinding tetap, sedangkan materi di dalamnya bergerak. Reaktor tabung ini biasanya dipanaskan menggunakan sistem pemanas eksternal. Dalam beberapa kasus menggambarkan bahwa penggunaan *screw conveyor* adalah sebagai penggerak bahan

baku di dalam reaktor, reaktor bujur sangkar yang digerakan dengan sistem vibro-fluidiser, atau tabung dengan inner mixer. Reaktor tipe tubular memiliki beberapa keuntungan, seperti beroperasi secara kontinu, terhindar dari kebocoran, memiliki permukaan perpindahan panas yang luas, dan memudahkan reformasi gas sintetis. Reaktor ini juga mudah dirancang apabila koefisien perpindahan panas sudah diketahui karena sifatnya yang sederhana dan aman. Salah satu ciri khas dari reaktor tabung adalah *reaktor screw conveyor* yang memiliki biaya konstruksidan operasional yang rendah. Kecepatan sekrap pada desain ini dapat diatur dalam rentang 0,5-25 rpm, sehingga *residence time* reaktor dapat diubah sesuai kebutuhan. Sistem reaktor ini sangat berguna untuk termal dan *cracking* katalitik, terutama apabila digunakan untuk limbah plastik. Pada skala kecil hingga menengah, reaktor tabung bisa menjadi pilihan yang kompetitif. Suhu operasi tergantung pada produk yang dipilih. Skema torefaksi menggunakan reaktor tabung tipe *screw reactor* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Reaktor Tipe Tubular Jenis *Screw Reactor* (Cremers & Sebnem, 2015).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdapat alat utama dan alat pendukung seperti pada tampilan Gambar 3.1.

1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket* seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *Oil Jacket* dari LPG.

Alat utama yang digunakan antara lain: reaktor torefaksi tipe tubular, pemantik api, tabung LPG 12 kg, regulator LPG, termokopel tipe K, 12 *Channel Temperature Recorder Datalogger*. Sedangkan untuk alat

pendukung yang digunakan adalah timbangan digital, kamera, laptop, plastik kedap udara, dan kabel listrik. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan system pemanas *oil jacket* memiliki spesifikasi lengkap seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular.

Spesifikasi	Komponen	Ukuran / Jenis
Reaktor	Diameter screw	: 195 mm
	Diameter tabung dalam	: 203,2 mm
	Diameter tabung luar	: 254 mm
	Panjang reactor	: 1600 mm
	Tinggi reactor	: 1700 mm
	Jarak pitch	: 100 mm
	Diameter poros	: 50 mm
	Kecepatan putar	: 0,5 rpm
	Kapasitas maksimum	: 5 kg/jam
Sistem Penggerak	Electromotor	: 2 unit (2 Hp dan 0,5 Hp)
	Ratio gear reducer	: 2 unit (1 : 60)
Medium Pemanas	Jenis medium pemanas	: Heat Transfer Oil Carflo TM AF
	Merk medium pemanas	: Petro Canada
	Temperatur maksimum	: 375 °C
	Tekanan kerja	: 1 atm
Sistem Pembakaran	Ruang bakar	: Horizontal Burner
	Bahan bakar	: Liquefied Petroleum Gas (LPG)
Sistem Kontrol Temperatur	Sensor Temperatur	: Thermocouple Tipe K
Sistem Pendingin Char	Sistem sirkulasi air	: Water Pump

2. 12 Channel Temperature Recorder Datalogger

12 Channel Temperatur Recorder Datalogger seperti pada Gambar 3.2 dibawah ini, memiliki fitur tampilan yang berfungsi sebagai perangkat pengukur suhu, mampu merekam data dalam interval 1 hingga 3600 detik, dan secara otomatis menyimpan data dalam format excel. Alat ini dapat dihubungkan dengan 12 probe termokopel tipe J/T/E/R/S dengan resolusi suhu sebesar $0,1^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$ atau $0,1^{\circ}\text{F}/1^{\circ}\text{F}$.



Gambar 3.2 12 channel temperature recorder datalogger.

3. Sampel Pelelah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pelepas kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.), seperti Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Sampel mentah pelepah sawit (*elaeis guineensis jacq.*).

3.2 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan sampel pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) yang diberikan perlakuan torefaksi dalam berbagai ukuran pada temperatur yaitu 275°C dengan waktu tinggal (residence time) selama 30 menit. Setiap sampel pelepah kelapa sawit memiliki massa antara 200 gram dalam keadaan mentah. Rancangan penelitian ini bertujuan untuk mengamati beberapa parameter, termasuk nilai kalor, komposisi *ultimate*, dan komposisi *proximate*. Analisis komposisi *ultimate* dan *proximate* dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi senyawa pada hasil akhir proses pembakaran pelepah kelapa sawit dalam kondisi tertentu. Analisis nilai kalor sampel pelepah kelapa sawit bertujuan untuk menentukan pendekatan terhadap nilai bahan bakar secara konvensional. Selain itu, analisis *mass yield* dan *energy yield* dilakukan untuk menganalisis penurunan massa pada sampel pelepah kelapa sawit setelah melalui proses torefaksi. Penurunan massa ini berkaitan dengan persentase penguapan kadar air (volatile) dalam sampel pelepah kelapa sawit.

3.3 Prosedur Pengujian Torefaksi

Prosedur proses torefaksi pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan kelengkapan seluruh alat dan bahan pendukung torefaksi, seperti menghubungkan tabung LPG 12 Kg ke regulator, meletakkan LPG kedalam ember berisi air sirkulasi *cooling char* dan menghubungkan pompa air sirkulasi ke *cooling char* melalui pipa atau selang.
2. Mempersiapkan sampel mentah pelepah kelapa sawit.
3. Memasang seluruh *Thermocouple* yang ada pada Reaktor dan *Cooling char* ke Thermocouple Reader 12 channel.
4. Menghidupkan motor penggerak screw conveyer.
5. Menyalakan api burner dengan mengatur katup pada regulator LPG.
6. Menunggu temperatur T1, T2, T3 mencapai suhu yang diinginkan.
7. Menjaga temperatur T1, T2, T3 apabila sudah mencapai suhu yang diinginkan dengan mengatur katup regulator LPG dan tunggu 15 menit – 30 menit sampai temperatur T1, T2, T3 stabil.
8. Memasukan sampel pelepah kelapa sawit mentah melalui *hooper*, dan menunggu sampel keluar dengan waktu *residence time* selama 30 menit.
9. Mendorong pendorong pada *cooling char*, setelah melewati *residence time* dan membuka katup pembuka pada *cooling char*.
10. Ulangi langkah 6 – 10 untuk variasi ukuran pada temperatur 275 °C.

Catatan: menjaga temperatur torefaksi dengan mengatur bukaan katup regulator.

3.4 Parameter Penelitian

Parameter penelitian menggunakan variabel tetap dan variabel berubah. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui kondisi proses torefaksi terbaik dengan menggunakan reaktor kontinu tipe tubular. Penelitian ini menggunakan parameter utama torefaksi, yaitu variasi ukuran, parameter utama digunakan untuk mendapatkan parameter ukuran optimal pada proses

torefaksi dengan variasi 275 °C. Biomassa yang digunakan adalah pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*Jacq.)

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui karakteristik bahan bakar yang diperoleh dari torefaksi adalah pengujian analisis *ultimate* dan analisis *proximate*. Selain itu, dilakukan pengujian nilai kalor pembakaran untuk menunjukkan besar nilai per satuan massa dari masing-masing temperatur. Penelitian ini juga mencakup seberapa jauh proses torefaksi dapat meningkatkan kualitas sifat-sifat pembakaran dari sampel-sampel pada kondisi *as-received* dengan perhitungan perolehan massa, γ_m (*mass yield*) dan perolehan energinya, γ_e (*energy yield*).

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut

- Studi Literatur: tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Dimulai dengan mempelajari tentang torefaksi, biomassa, reaktor torefaksi, mekanisme torefaksi, dan karakteristik bahan bakar padat.
- Persiapan Alat torefaksi: persiapan perlengkapan alat-alat utama reaktor serta alat pendukung reaktor torefaksi, seperti melakukan pengecatan ulang reaktor, penggantian komponen yang rusak seperti termokopel, karburator dan selang gas, pergantian *hooper* serta membeli peralatan pendukung seperti timbangan, wadah produk dan lain-lain.
- Proses Torefaksi: Pada tahap ini dilakukan pengujian dengan menguji seluruh sampel yang ada dengan variasi ukuran dengan temperatur torefaksi yakni 275 °C.
- Pengujian Laboratorium: setelah seluruh sampel dilakukan torefaksi dan didapatkan produk hasil torefaksi, selanjutnya dilakukan pengujian laboratorium tahap dimana dengan mengirimkan sampel mentah dan sampel produk hasil torefaksi setiap temperatur untuk dilakukan

pengujian *Moisture Content*, *Proximate*, pengujian *Ultimate*, dan *Calorific Value*.

- Analisis Hasil Seluruh Pengujian: setelah semua data telah terkumpul, tahapan selanjutnya adalah menganalisis hasil seluruh data pengujian dari hasil laboratorium. Analisis data meliputi analisis *proximate*, analisis *ultimate* dan *Calorific Value*.
- Kesimpulan: Langkah terakhir dari penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian dan dituangkan dalam bentuk laporan tugas akhir.

3.6 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

3.7.1 Tempat Penelitian

Lokasi penelitian dilaksanakan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Unila dan bekerja sama dengan Laboratorium Pengujian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Batubara (Puslitbang Tekmira) di Jl. Jend. Sudirman No.623 Kota Bandung.

3.7.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2023 sampai dengan bulan Januari 2024.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses torefaksi pada pelepah sawit dengan variasi ukuran dan temperatur 275°C menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 6191.81 kkal/kg pada ukuran cacah. Dengan nilai *Fixed Carbon* yang didapat sebesar 16.06%, *Moisture Content* sebesar 7.88%, *Volatile Matter* sebesar 70.97%, dan *Ash* sebesar 5.1%. Penelitian ini juga menghasilkan kadar atom karbon (C) meningkat 7,2% pada ukuran cacah, sementara kadar oksigen (O) naik 48,6% pada ukuran cacah. Atom hidrogen (H) dan Nitrogen (N) mengalami penurunan berturut-turut sebesar 91,4% dan 30,5%. Dengan *mass yield* yang didapat pada ukuran cacah sebesar 50%, *energy yield* sebesar 66,9%, dan *energy density* sebesar 1,33 kJ/kg.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan penulis pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian lanjutan terkait pengujian total sulfur di laboratorium agar dapat meminimalkan potensi kesalahan dalam analisis pengujian *ultimate*, terutama terkait komposisi dan kandungan pada sampel mentah serta produk torefaksi.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami pengaruh

residence time dan suhu terhadap proses torefaksi dengan variasi ukuran yang berbeda.

3. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai proses torefaksi secara anaerobik, mengingat pada reaktor kontinu torefaksi tipe tabung masih terdapat jeda saat memasukkan sampel biomassa ke dalam *hopper*, yang membuat oksigen dapat ikut masuk kedalam reaktor agar nantinya hasil bahan bakar dari produk torefaksi dapat dioptimalkan secara maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul, Hardianto, T., Suwono, A., Pasek, A. D., dan Irhamna, A. (2013). Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi : Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya. Prosiding SNTTM XIII, 23–24.
- Apriyanto, A., Amrul H, dan Amrizal N. (2019). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Mechanical*, 9(2), 54. <https://doi.org/10.23960/mech.v9.i2.201809>
- Arhamsyah, Arhamsyah. "Pemanfaatan Biomassa Kayu sebagai Sumber Energi Terbarukan." *Indonesian Journal of Industrial Research*, vol. 2, no. 1, 2010, pp. 42-48, doi:[10.24111/jrihh.v2i1.914](https://doi.org/10.24111/jrihh.v2i1.914).
- Aulia, A., Farid, F., dan Zahar, W. (2021). Korelasi Parameter Analisis Proksimat dan Analisis Ultimat terhadap Nilai Kalori Batubara. 2(1), 21–30. <https://doi.org/10.31764/jpl.v2i1.4715>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Second). Elsevier Inc. www.elsevierdirect.com/rights
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Third). Elsevier Inc. www.elsevierdirect.com/rights
- Elisabeth, J., dan Ginting, S. P. G. (2013). Pemanfaatan Hasil Samping Industri Kelapa. Lokakarya Sistem Integrasi Kelapa Sawit-Sapi, 110–119.

- Gde Suastika. (2019). Proses Torefaksi Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Cangkang Sawit dengan Metode COMB. *Risalah Fisika*, 3(2), 47–50. <https://doi.org/10.35895/rf.v3i2.159>
- Irawan, A., Riadz, T., dan Nurmalisa. (2015). Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Kandungan Hemiselulosa dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190–195.
- Junjungan, Elieser, S. E., Simanihuruk, K., Situmorang, M., dan Triyono. (2015). *Loka Penelitian Kambing Potong*.
- Papilo, P. (2012). Briket pelepah kelapa sawit sebagai sumber energi alternatif yang bernilai ekonomis dan ramah lingkungan. *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 9(2), 67–78.
- Parinduri, L. (2020). Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88–92.
- Poudel, J., Ohm, T., dan Cheon, S. (2015). *A study on torrefaction of food waste*. *Fuel*, 140, 275–281.
- Rachman, A. K., Notosudjono, D., dan Soebagia, H. (2018). Studi perencanaan energi biomassa dari limbah padi sebagai alternatif untuk bahan bakar pembangkit listrik di Kota Bogor. *Journal FTEKNIK*, 1(1), 1–14.
- Rahma, H., dan Imzastini, N. Q. (2021). *Steam Electricity Power Plant (PLTU): The Politics of Energy in Indonesia*. Acir 2018, 101–106. <https://doi.org/10.5220/0010273701010106>
- Sidabutar, V. T. P. (2018). Kajian Peningkatan Potensi Ekspor Pelet Kayu Indonesia sebagai Sumber Energi Biomassa yang Terbarukan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 12, 99–116.

- Sulistio, Y., Febryano, I. G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., dan Hidayat, W. (2020). Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)* dan *Electric Furnace* terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*, 8(1), 65–76. <https://doi.org/10.23960/jsl1865-76>
- Susanty, W., Helwani, Z., dan Zulfansyah. (2016). Torefaksi Pelepah Sawit : Pengaruh Kondisi Proses terhadap Nilai Kalor Produk Torefaksi. *FTEKNIK*, 3(1), 1–6.
- Susilowati, Komalasari, dan Helwani, Z. (2017). Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu dan Ukuran Bahan Baku. *jom FTEKNIK*, 4(1), 1–4.
- Wenas, A. A., dan Hardianto, T. (2021). Pengaruh Torefaksi terhadap Pencucian Potassium dalam Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan. *JMPM: Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 5(2), 123–140.
- Yusuf, M., Sulaeman, R., dan Sribudiani, E. (2014). Pemanfaatan Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis jacq.*) Sebagai Bahan Baku Pembuatan Briket Arang. *Jurnal Online Fakultas Pertanian Universitas Riau*, 1(1), 1–7.