

**STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT
UNTUK MENDAPATKAN KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT
DENGAN VARIASI TEMPERATUR**

(Skripsi)

Oleh:

M. Yuda Prasetyo Nugroho

NPM 1915021023



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT UNTUK MENDAPATKAN KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT DENGAN VARIASI TEMPERATUR

Oleh

M. YUDA PRASETYO NUGROHO

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proses torefaksi pada pelepah sawit pada temperatur 200-300°C terhadap nilai kalor dan sifat kimia sampel. Sampel pelepah sawit diolah dengan proses torefaksi pada temperatur 200-300°C selama 30 menit dan kemudian dilakukan uji *proximate* dan uji *ultimate* pada sampel terbaik yang telah dilakukan pengujian nilai kalor untuk mengevaluasi komposisi kimia dan sifat fisik-kimia produk. Hasil pengujian nilai kalor untuk mengetahui efek torefaksi pada nilai energi sampel menunjukkan bahwa proses torefaksi pada temperatur 200-300°C dapat meningkatkan nilai kalor sampel pelepah sawit. Peningkatan nilai kalor terbaik yaitu pada sampel pelepah sawit yang telah dilakukan proses torefaksi pada temperatur 275°C meningkat sebesar 15,6% dibandingkan dengan sampel pelepah sawit mentah. Selain itu, uji *proximate* menunjukkan bahwa proses torefaksi dapat meningkatkan kadar abu dan serat kasar serta menurunkan kadar air, protein, dan lemak pada sampel. Uji *ultimate* menunjukkan bahwa proses torefaksi pada temperatur 275°C dapat meningkatkan kadar karbon dan mengurangi kadar hidrogen serta oksigen pada sampel. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa proses torefaksi pada temperatur 275°C dapat meningkatkan nilai kalor dan mengubah komposisi kimia sampel pelepah sawit. Oleh karena itu, proses torefaksi pada temperatur 275°C dapat menjadi alternatif dalam memanfaatkan pelepah sawit sebagai bahan bakar biomassa dengan nilai energi yang lebih tinggi.

Kata Kunci: Energi Baru dan Terbarukan, Proses Torefaksi, Pelepah Sawit

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF PALM OIL TORREFACTION TO GET THE CHARACTERISTICS OF SOLID FUEL WITH VARIATION OF TEMPERATURE

By

M. YUDA PRASETYO NUGROHO

This study aims to evaluate the effect of the torefaction process on palm fronds at a temperature of 200-300 °C on the calorific value and chemical properties of samples. Palm frond samples were processed by a torefaction process at a temperature of 200-300 °C for 30 minutes and then proximate tests and ultimate tests were carried out on the best samples that had been tested calorific value to evaluate the chemical composition and physical-chemical properties of the product. The results of calorific value testing to determine the effect of torefaction on the energy value of the sample show that the torefaction process at a temperature of 200-300 °C can increase the calorific value of palm frond samples. The best calorific value increase was in palm frond samples that had been tofaction at a temperature of 275 °C increased by 15.6% compared to raw palm frond samples. In addition, the proximate test shows that the torefaction process can increase ash and crude fiber content and decrease the water, protein, and fat content in the sample. The ultimate test shows that the torefaction process at 275 °C can increase carbon levels and reduce hydrogen and oxygen levels in the sample. The torefaction process can also increase the thermal stability value of the sample. Based on the results of this study, it can be concluded that the torefaction process at a temperature of 275 °C can increase the calorific value and change the chemical composition of palm frond samples. Therefore, the process of torefaction at a temperature of 275 °C can be an alternative in utilizing palm frond as biomass fuel with higher energy value.

Keywords: *Renewable Energy, Torrefaction Process, Palm Frond.*

**STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI PELEPAH SAWIT
UNTUK MENDAPATKAN KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT
DENGAN VARIASI TEMPERATUR**

Oleh

M. YUDA PRASETYO NUGROHO

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **STUDI EKSPERIMENTAL TOREFAKSI
PELEPAH SAWIT UNTUK MENDAPATKAN
KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT
DENGAN VARIASI TEMPERATUR**

Nama Mahasiswa : **M. Yuda Prasetyo Nugroho**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915021023**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 1970331 199903 1 003

Hadi Prayitno, S.T., M.T.
NIP. 19800205 200501 1 002

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

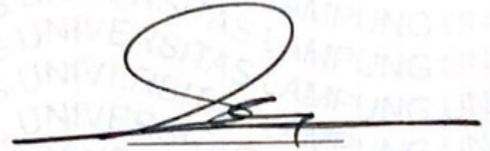
Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP. 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

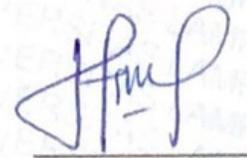
Ketua : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Irs Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **19 Juni 2023**

LEMBAR PERNYATAAN

SKRIPSI 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, 4 Agustus 2023

Pembuat Pernyataan,



M. Yuda Prasetyo Nugroho

NPM 1915021023

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karuna-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Shalawat serta Salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

KARYA TULIS INI KUPERSEMBAHKAN KEPADA

Ayahanda dan Ibunda Tecinta

Yang senantiasa memberikan semangat dan melantunkan do'a yang selalu menyertaiku. Terima kasih yang sebesar-besarnya kuucapkan karena telah mendidik dan membersarkanku dengan penuh kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang sampai kapanpun tidak akan bisa terbalaskan.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin 2019

Serta

Almamater Tercinta, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Mesin

MOTO

*"Ingatlah ketika kamu berada dalam kesulitan
katakanlah kamu bisa dan ketika kata sudah terucap
saatnya kamu bergerak mengubah kesulitan menjadi kemudahan."*

- M. Yuda Prasetyo Nugroho -

*"Jangan takut untuk bermimpi. Karena mimpi adalah
tempat menanam benih harapan dan memetik cita-cita."*

- Monkey D. Luffy -

*"Hiduplah seakan-akan kamu akan mati hari esok
dan belajarlah seolah kamu akan hidup selamanya."*

- Mahatma Gandhi -

*"Aku tidak menciptakan jin dan manusia
melainkan agar mereka beribadah kepada-Ku."*

- Q.S Az Zariyat: 56 -

*"Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.
Karena itu bila kau telah selesai (mengerjakan yang lain)
dan kepada Tuhan, berharaplah."*

- Q.S Al Insyirah: 6-8 -

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam semoga tetap tercurah limpahkan kepada junjungan besar kita, Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wassalam, beserta keluarga dan sahabat. Semoga kita sebagai umatnya, selalu mendapatkan syafaat beliau di akhirat kelak. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan skripsi. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat dan juga dapat dikembangkan khususnya dalam bidang energi terbarukan biomassa. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelas Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini tentunya penulis mendapatkan pengalaman dan pembelajaran dari beberapa pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ayahanda Sutiya dan Ibunda Suriyah yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan juga memberikan restu pada penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin di Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung juga selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing skripsi ini.

3. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
8. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Ayudia Kusuma Dewi yang telah memberikan semangat dan motivasi dalam pelaksanaan penelitian dan pembuatan skripsi ini.
10. Seluruh tim penelitian torefaksi Teknik Mesin M. Ardy Yusuf, Alifiandi Laksana, Andreas Novendra, M Hafid, Nur Fajar Septyanto, Yoggi Pahlevy, Calvin Andyansa Falah, Almer Elian, Ichsan Restu, Rifqi Fauzan Hakim, Fadhlán Azhim, Rizki Kurniawansyah, Risky M Desnal, Prengki, Mas Ali, dan Mas Machfud.
11. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2019 yang telah bersama-sama berjuang meraih mimpi, memberikan motivasi, dan memberikan semangat selama perkuliahan.
12. Serta semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu menyelesaikan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kemajuan ilmu pengetahuan di masa mendatang. Akhir kata penulis sangat berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2023

Penulis,

M. Yuda Prasetyo Nugroho

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama M. Yuda Prasetyo Nugroho, lahir pada tanggal 28 Oktober 2000 di Kota Bandung, Provinsi Jawa Barat. Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Sutiya dan Ibu Suriyah. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Cibiru 4 Kota Bandung hingga tahun 2013, kemudian dilanjutkan di SMPN 8 Bandung yang selesai pada tahun 2016 dan di SMAN 21 Bandung yang lulus pada tahun 2019. Selama menjalani pendidikan SMA, penulis aktif dalam organisasi internal sekolah. Penulis aktif dalam kegiatan Ektrakurikuler Bola Basket dan menjabat sebagai ketua pada tahun 2017-2018. Pada tahun 2018 penulis juga berkesempatan untuk mewakili sekolah dalam ajang Olimpiade Sains Nasional bidang Astronomi se-Provinsi Jawa Barat.

Pada tahun 2019, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama melaksanakan studi, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Ketua Bidang Organisasi dan Kepemimpinan (ORGAPIN) 2021-2022. Tahun 2021 penulis berkesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT Komatsu *Undercarriage* Indonesia, Kota Bekasi, Provinsi Jawa Barat dengan judul laporan **“Analisis Perhitungan Untuk Perencanaan Remanufaktur dengan Metode *Hardfacing Welding* Komponen *Undercarriage Bulldozer Roller D375* di PT Komatsu *Undercarriage* Indonesia”**

Pada tahun 2023 penulis menyelesaikan program studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi **“Studi Eksperimental Torefaksi Pelelah Sawit untuk Mendapatkan Karakteristik Bahan Bakar Padat dengan Variasi Temperatur”** dengan bimbingan Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Hadi Prayitno, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
SANWACANA	x
RIWAYAT HIDUP	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	5
1.3 Batasan Masalah	6
1.4 Sistematika Penulisan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Biomassa.....	8
2.2 Pelepah Kelapa Sawit (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>)	9
2.3 Parameter Analisis Bahan Bakar Padat	11
2.3.1 Nilai Kalor.....	12
2.3.2 Analisis <i>Proximate</i>	12
2.3.3 Analisis <i>Ultimate</i>	14
2.3.4 Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat.....	15
2.4 Torefaksi	16
2.4.1 Mekanisme Torefaksi.....	17
2.4.2 Parameter Torefaksi	18

2.4.3 Kualitas Produk Torefaksi.....	20
2.4.4 Jenis-jenis Reaktor Torefaksi	22
2.4.5 Reaktor Torefaksi Tipe Tubular	23
III. METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Alat dan Bahan.....	25
3.2 Rancangan Penelitian.....	28
3.3 Prosedur Pengujian Torefaksi	28
3.4 Parameter Penelitian Karakteristik Bahan Bakar Padat.....	29
3.5 Tahapan Penelitian.....	30
3.6 Alur Tahapan Penelitian	31
3.7 Tempat dan Waktu Penelitian.....	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Karakteristik Visual Produk.....	34
4.2 Nilai Kalor	37
4.3 Analisis <i>Proximate</i>	40
4.4 Analisis <i>Ultimate</i>	43
4.5 <i>Mass Yield</i> dan <i>Energy Yield</i>	46
4.6 Rasio O/C dan H/C	47
V. PENUTUP.....	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Physicochemical biomassa saat torefaksi.....	18
Gambar 2.2 Reaktor Tipe Tubular Jenis <i>Screw Reactor</i>	24
Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular.....	25
Gambar 3.2 12 <i>channel temperature recorder datalogger</i>	27
Gambar 3.3 Sampel mentah pelepah sawit (<i>elaeis guineensis jacq.</i>).	27
Gambar 3.4 Diagram alur penelitian.....	32
Gambar 4.1 Sifat visual sampel mentah dan produk hasil torefaksi dengan 5 variasi temperatur.	35
Gambar 4.2 Grafik nilai kalor produk torefaksi pelepah sawit.....	38
Gambar 4.3 Grafik hasil uji <i>proximate</i> sampel biomassa pelepah sawit.	41
Gambar 4.4 Grafik hasil uji <i>ultimate</i> sampel biomassa pelepah sawit.	44
Gambar 4.5 Grafik perolehan massa (<i>mass yield</i>) dan energi (<i>energy yield</i>).	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Kandungan kelapa sawit (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	11
Tabel 2.2 Metode penyajian dari bahan bakar padat.....	15
Tabel 3.1 Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular	26
Tabel 4.1 Plot klasifikasi produk torefaksi sampel pelepah sawit	40

NOMENKLATUR

C	Karbon
Cl	Klor
$E_{torrefied\ product}$	Nilai Kalor Produk torefaksi (cal/g)
$E_{raw\ biomass}$	Nilai Kalor Biomassa Mentah (cal/g)
EY	<i>Energy Yield</i>
FC	<i>Fixed Carbon</i>
H	Hidrogen
HHV	<i>Higher Heating Value</i> (cal/g)
LHV	<i>Low Heating Value</i> (cal/g)
MY	<i>Mass Yield</i>
N	Nitrogen
O	Oksigen
S	Sulfur
VM	<i>Volatile Matter</i>

SUBSCRIPT

adb	<i>air dry basis</i>
Ar	<i>As-received basis</i>
daf	<i>dry ash free basis</i>
db	<i>dry basis</i>
dmmf	<i>Dry, mineral-matter free</i>
f	produk torefaksi
maf	<i>moisture ash free</i>
o	biomassa mentah

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan sumber energi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk di dunia. Termasuk juga kebutuhan akan sumber energi listrik. Pemanfaatan sumber energi listrik semakin berkembang tidak hanya akan berfokus pada penerangan, pemanfaatan dari energi listrik juga mencakup berbagai bidang. Sementara itu sumber bahan bakar utamanya yaitu energi bahan bakar fosil terus mengalami penurunan. Krisis energi konvensional yang dimana bahan bakar fosil menjadi sumber utama bahan bakar sudah terjadi dan akan semakin parah di masa yang akan datang. Oleh karena itu bahan bakar alternatif yang dapat diperbaharui (*renewable*), ramah lingkungan dan juga bernilai ekonomis harus terus dicari dan dilakukan (Papilo, 2012).

Pemanfaatan energi terbarukan (EBT) sejalan dengan komitmen pemerintah dalam menurunkan emisi karbon dari isu pemanasan global atau sering dikenal dengan *global warming* tidak asing lagi di kalangan masyarakat. Pemanasan global merupakan peristiwa kenaikan temperatur di permukaan bumi yang diakibatkan dari emisi karbondioksida. Temperatur yang mengalami kenaikan terus menerus akan menyebabkan iklim berubah.

Salah satu langkah penting yang dilakukan oleh Pemerintah Indonesia adalah dengan meratifikasi *Paris Agreement to the United Nation Framework*

Convention on Climate Change (Peretujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim) melalui UU No. 16 Tahun 2016 pada tanggal 24 Oktober 2016. Dalam kesepakatan tersebut, Indonesia bersama dengan negara-negara di dunia membuat komitmen untuk menahan kenaikan temperatur rata-rata global dibawah 2°C. 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 emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer tidak melebihi jumlah emisi yang mampu diserap oleh bumi. Untuk mencapainya diperlukan sebuah transisi dari sistem energi yang digunakan sekarang ke sistem energi bersih guna mencapai kondisi seimbang antara aktivitas manusia dengan keseimbangan alam. Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam melakukannya 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 memberikan dampak yang 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.

Fokus utama pemerintah Indonesia dalam menurunkan emisi karbon adalah dengan menurunkan penggunaan pembangkit listrik berbasis fosil dengan memasifkan 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), dimana 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 yang tidak terbarukan, yaitu batubara.

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 merupakan bahan organik yang berasal dari proses fotosintesis, baik berupa produk maupun sisa dari pemakaian. Contoh dari biomassa adalah kayu, tanaman, sisa hasil pertanian, sisa hasil hutan, dan kotoran ternak. Selain penggunaan sebagai bahan pangan, bahan bangunan, dan lain sebagainya, biomassa juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti energi fosil. Biomassa yang umum digunakan sebagai sumber energi adalah yang memiliki nilai ekonomis rendah atau sisa dari produk primer.

Indonesia merupakan negara dengan angka produksi kelapa sawit terbesar di dunia, hal ini juga menyebabkan limbah dari biomassa kelapa sawit melimpah. Saat ini pelepah sawit hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak, kompos, dan

juga dibiarkan di perkebunan. Pemanfaatan kelapa sawit dengan cara ini tidak akan memberikan penambahan nilai ekonomi. Pelepah sawit akan memiliki nilai ekonomi yang bertambah apabila dapat dimanfaatkan, salah satunya sebagai sumber energi terbarukan, karena pelepah sawit memiliki potensi energi sebesar $\pm 1,3$ TJ per tahunnya (Susanty dkk, 2016).

Torefaksi merupakan proses dari pengolahan biomassa dengan rentang temperatur 200-300°C. Pada temperatur 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 merupakan salah satu dari proses termokimia yang saat ini banyak digunakan dalam meningkatkan nilai kalor dari biomassa dan untuk menurunkan 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 telah 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. Tujuan utama torefaksi adalah meningkatkan nilai kalor pelepah sawit sebagai bahan bakar biomassa. Dengan variasi temperatur penelitian ini dapat mengevaluasi temperatur optimal yang menghasilkan peningkatan nilai kalor.

Variasi temperatur yang digunakan dalam proses torefaksi dapat mempengaruhi komposisi kimia pelepah sawit setelah melalui proses torefaksi berupa perubahan kandungan karbon, hydrogen, oksigen, nitrogen, dan komponen lainnya untuk memahami transformasi kimia yang terjadi selama proses torefaksi pelepah sawit. Torefaksi pada temperatur yang berbeda juga dapat mempengaruhi karakteristik pelepah sawit setelah proses torefaksi, seperti warna, tekstur, dan kepadatan.

Penelitian ini juga dapat memberikan wawasan tentang reaksi termal yang terjadi selama proses torefaksi pelepah sawit. Pemahaman terhadap profil temperatur dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi torefaksi yang optimal. Tujuan akhir dari penelitian torefaksi pelepah sawit dengan menggunakan variasi temperatur adalah mengoptimalkan kondisi proses torefaksi, sehingga dapat menghasilkan pelepah sawit dengan nilai kalor yang tinggi dan karakteristik yang sesuai dengan teori proses torefaksi.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian torefaksi pelepah sawit ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai kalor yang didapatkan dari produk torefaksi sampel pelepah sawit
2. Mengetahui perubahan karakteristik produk torefaksi sampel pelepah sawit dari analisis *proximate*.
3. Mengetahui perubahan karakteristik produk hasil torefaksi sampel pelepah sawit dari analisis *ultimate*.

4. Mengetahui perolehan nilai *mass yield* dan *energy yield* dari produk torefaksi pelepah sawit.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini terdapat batasan-batasan masalah sebagai berikut.

1. Sampel-sampel biomassa berbentuk *chip* yang tidak seragam.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor torefaksi tipe *tubular system oil jacket* dengan sumber pemanas LPG.
3. Variasi temperatur torefaksi dilakukan dengan 3 temperatur yakni 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°C.
4. Pengujian sample torefaksi dilakukan dengan uji *proximate analysis* dan *ultimate analysis* pada satu sampel terbaik dari lima variasi temperatur yang telah dilakukan pengujian nilai kalor.
5. Residence time dilakukan dengan waktu 30 menit.

1.4 Sistematika Penulisan

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 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.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Secara umum biomassa merupakan bahan yang diperoleh dari tanaman secara langsung maupun tidak langsung, biomassa juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi atau bahan bakar dengan jumlah yang besar. Biomassa juga disebut sebagai “fitomassa” dan dapat diterjemahkan sebagai *biosource* atau sumber daya yang diperoleh dari kekayaan hayati. Sumber daya yang dimaksud meliputi ratusan dan ribuan spesies tanaman baik di daratan maupun di lautan, berbagai sumber perhutanan, pertanian, dan sisa pembuangan dari proses industri, dan kotoran hewan (Rachman dkk, 2018).

Biomassa merupakan bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk maupun sisa pemakaian. Contoh dari biomassa antara lain adalah tanaman, rumput, daun, limbah perkebunan, limbah pertanian, tinja, dan kotoran hewan. Selain digunakan sebagai pakan ternak, bahan pangan, bahan bangunan, minyak nabati biomassa juga digunakan dapat 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 digunakan sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik seperti 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. Kandungan yang terdapat dalam biomassa yaitu berupa 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 tergantung pada komposisi dari biomassa tersebut, semakin tinggi kandungan karbon terikat maka nilai kalornya akan semakin tinggi. Nilai kalor biomassa merupakan salah satu parameter dari pemilihan biomassa saat akan digunakan dalam pembangkit listrik sebagai bahan bakar utama maupun bahan bakar pendamping untuk batubara (Sidabutar, 2018).

2.2 Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Kelapa sawit (*Elaeis guenensis jacq.*) merupakan tumbuhan industri penghasil minyak industri, minyak sawit, maupun bahan bakar (biodiesel). Produksi dari kelapa sawit menghasilkan keuntungan besar sehingga banyak areal hutan dan perkebunan diubah menjadi perkebunan kelapa sawit. Indonesia adalah penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia dengan luas areal perkebunan sawit 14,9 juta hektare (ha) pada tahun 2021. Perkebunan kelapa sawit terbesar berada di Provinsi Riau, Kalimantan Tengah, Kalimantan Timur, Kalimantan Barat, dan Sumatera Utara. Perkebunan kelapa sawit dengan luas terkecil berada di Provinsi Kep. Riau, Maluku, Maluku Utara, Gorontalo, dan Jawa Barat (Badan Pusat Statistik, 2021).

Perkebunan kelapa sawit menghasilkan sisa dari hasil produksi yang belum dimanfaatkan secara optimal, 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 dan difermentasikan menjadi kompos (Yusuf dkk, 2014).

Pelepah kelapa sawit merupakan salah satu limbah biomassa yang banyak dihasilkan dari perkebunan sawit. 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 dari biomassa pelepah sawit sekitar 17200 kJ/kg (Susilowati dkk, 2017).

Untuk meningkatkan nilai jual dari pelepah sawit, maka pelepah sawit harus melalui proses yang akan membuat nilai pelepah sawit menjadi tinggi, tentunya dengan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kalor pelepah sawit mentah dan diharapkan dapat bersaing dengan bahan bakar lainnya.

Sampel Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) memiliki komposisi kimia dalam bentuk mentah pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Kandungan 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)

Dapat dilihat pada Tabel 2.1 Kandungan hemiselulosa dan selulosa yang cukup tinggi pada pelepah kelapa sawit perlu dilakukan proses termal agar kandungan hemiselulosa dan selulosa pada pelepah sawit dapat berkurang dengan melalui proses torefaksi. Pada proses torefaksi hemiselulosa akan terdekomposisi lebih cepat dibandingkan selulosa dan lignin. Sehingga hal ini dapat membuat hasil torefaksi pelepah sawit akan mengurangi kadar zat volatil pada pelepah sawit.

2.3 Parameter Analisis Bahan Bakar Padat

Karakteristik dari biomassa dapat dilihat secara fisik, kimiawi, sifat panas, dan kandungan kimia. Terdapat tiga analisis yang dilakukan dalam menentukan sifat kimiawi dan karakteristik suatu bahan bakar yaitu analisis *proximate*, analisis *ultimate*, dan analisis *thermogravimetric*. Parameter yang menjadi acuan dari kualitas bahan bakar padat yaitu parameter komponen berdasarkan

penyusun batubara. Dalam mendapatkan komponen penyusun dari batubara digunakan dua jenis analisis yaitu *proximate analysis* dan *ultimate analysis*.

2.3.1 Nilai Kalor

Nilai Kalor bahan bakar merupakan nilai besarnya panas yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar padat. 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 temperatur awal sebesar 25°C setelah dibakar habis dan sisa pembakaran kembali ke temperatur awal sebesar 25°C. Panas ini juga termasuk panas laten dari penguapan air. HHV ini juga dapat disebut dengan *Gross Caloric Value*. LHV dapat didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan dengan pembakaran total pada jumlah tertentu. LHV ini juga berbeda dengan HHV yaitu pada proses pembakaran tidak melibatkan panas laten dari penguapan air. LHV disebut juga 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 untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat seperti nilai kandungan karbon tetap, *volatile matter*, kandungan air, dan abu.

- a. Karbon Tetap (*Fixed Carbon*) adalah karbon tetap yang ditemukan setelah pelepasan zat volatil. Karbon ini juga berbeda dari karbon lainnya, karena adanya unsur karbon yang menghilang selama proses penguapan kemudian membentuk ikatan hidrokarbon bersama zat volatil. Karbon tetap merupakan penyumbang terbesar dari nilai kalor pada bahan bakar padat.
- b. Zat Volatil (*Volatile Matter*) merupakan komponen dalam bahan bakar padat selain air yang terlepas ketika bahan bakar dilakukan pemanasan dengan kondisi *inert* atau tanpa oksigen. Zat volatile ini merupakan hidrokarbon siklik, alifatik maupun aromatik. Zat volatil menghasilkan kalor dalam proses pembakaran namun tidak sebesar nilai karbon tetap.
- c. Kandungan air (*Moisture Content*) dalam bahan bakar padat terbagi menjadi dua jenis, yaitu *surface moisture* dan *inherent moisture*. *Surface moisture* merupakan kandungan air yang terdapat pada bagian permukaan dari bahan bakar padat, sedangkan *inherent moisture* merupakan kandungan air yang terdapat 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*) merupakan kandungan yang terdiri mineral dalam bahan bakar padat dalam bentuk unsur dan oksida. Mineral yang

terkandung dalam abu berupa silika, natrium, magnesium, dan oksida.

2.3.3 Analisis *Ultimate*

Analisis *proximate* merupakan salah satu analisis untuk mengetahui parameter penyusun bahan bakar padat seperti kadar karbon, kadar hidrogen, kadar nitrogen, kadar oksigen, dan total sulfur (Aulia dkk, 2021).

- a. Nilai karbon, karbon yang terdapat dalam batubara akan terjadi peningkatan sesuai dengan meningkatnya derajat batubara. Karbon bertambah sesuai dengan naiknya derajat dari batubara sekitar 60-100%.
- b. Nilai hidrogen, hidrogen yang terdapat dalam batubara terdiri dari kombinasi antara alifatik dan aromatik dan berangsur habis akibat dari evolusi metana.
- c. Nilai oksigen, oksigen yang terdapat dalam batubara berupa ikatan hidroksil, metoksil, dan juga karbonit, yang merupakan oksigen tidak reaktif.
- d. Nilai nitrogen, nitrogen yang terdapat dalam batubara dapat berupa senyawa organik. Nitrogen yang terbentuk hampir seluruhnya berasal dari protein bahan tanaman asalnya. Jumlah dari nitrogen sekitar 0,5-3,0%. Batubara bituminus biasanya memiliki kandungan nitrogen yang lebih banyak dibandingkan lignit dan antrasit.

- e. Nilai sulfur, sulfur dalam batubara pada umumnya hanya terdapat dalam jumlah yang kecil dan kemungkinan berasal dari protein tanaman pembentuk dan juga diperkaya oleh bakteri sulfur.

2.3.4 Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat

Metode penyajian dari karakteristik bahan bakar padat atau batubara memiliki penyajian yang berbeda-beda. Oleh karena itu diperlukan adanya referensi kondisi yang sama untuk membandingkannya. Berikut merupakan metode penyajian dari karakteristik bahan bakar padat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Metode penyajian dari 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-matter free</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-matter free</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 temperatur 200-300°C dibawah tekanan atmosfer tanpa adanya oksigen (*inert*) untuk menghasilkan produk akhir dengan nilai kalor setara dengan batubara sub-bituminus B menurut kualifikasi standard ASTM D 388 (Amrul dkk, 2013). Temperatur torefaksi yang meningkat akan mengakibatkan dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa sehingga gas *volatile* akan meningkat. Penambahan zat *volatile* diawali dengan hemiselulosa terdekomposisi dilanjutkan lignin dan selulosa terdekomposisi.

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

Manfaat dari proses torefaksi yaitu untuk mengurangi zat volatil yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Kandungan oksigen dari produk torefaksi yang lebih rendah, mengakibatkan rasio oksigen terhadap karbon sehingga biomassa memiliki karakteristik yang mendekati batubara. Salah satu parameter yang penting dalam pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar adalah kemudahan untuk mengecilkan ukurannya (*grindability*). Torefaksi juga dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, pelepah sawit, tandan kelapa sawit kosong dan lain sebagainya. Kualitas

produk torefaksi sangat ditentukan oleh nilai karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga membuat kandungan energi akan menurun (Irawan dkk, 2015).

2.4.1 Mekanisme Torefaksi

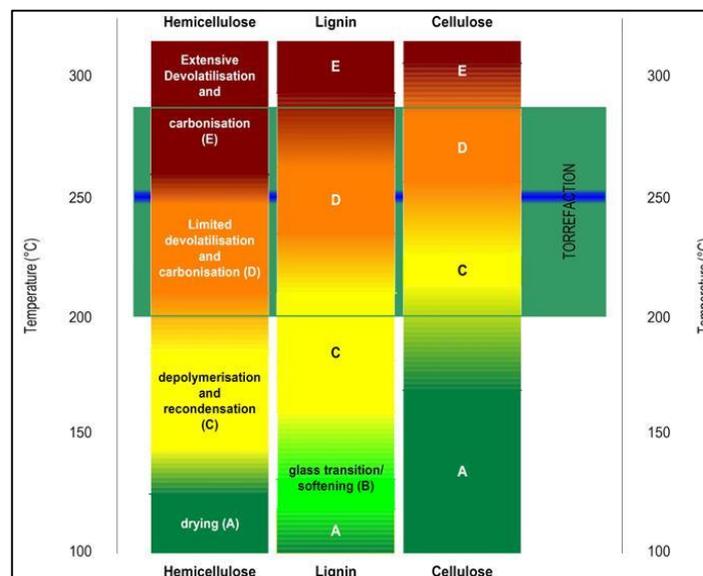
Tahapan awal dari proses torefaksi adalah pemanasan yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air pada permukaan biomassa (*surface moisture*). Air akan lepas dari ikatan dengan menggunakan reaksi kimia (*inherent moisture*). Air tersebut dihasilkan dari proses termokondensasi pada temperatur 160°C. Reaksi eksotermik akan terjadi pada temperatur 180-270°C, dan hemiselulosa akan mulai terdekomposisi. Proses dekomposisi menghancurkan ikatan rantai pada polimer hemiselulosa, gugus hidroksil (-OH) dan beberapa gugus lainnya. Proses dekomposisi ini akan menyebabkan perubahan warna pada biomassa dan lepasnya air, CO₂, asam asetat, fenol, dan *volatile matter* lainnya. Pada temperatur diatas 280°C produksi dari CO₂, asam asetat, fenol, dan hidrokarbon akan meningkat, keseluruhan proses kemudian menjadi eksotermik. Pada akhir proses torefaksi akan terbentuk padatan yang memiliki struktur polimer yang lebih pendek dan lebih sederhana dibandingkan sebelum ditorefaksi (Apriyanto dkk, 2019).

Konsep dari torefaksi adalah menghilangkan *volatile* dan mengkarbonisasi polimer biomassa pada temperatur 200-300°C. Akan tetapi, dekomposisi polimer biomassa secara sempurna tidak selalu terjadi pada pada temperatur torefaksi 200-300°C. Setiap polimer

terdegradasi pada temperatur yang berbeda, rentang temperatur dari polimer biomassa mengalami dekomposisi yakni:

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)

2.4.2 Parameter Torefaksi

Parameter-parameter yang dapat mempengaruhi proses torefaksi adalah sebagai berikut.

- a. Temperatur, temperatur merupakan pengaruh terbesar pada proses torefaksi karena tingkat degradasi termal biomassa. Temperatur yang lebih tinggi akan memberikan massa serta energi yang lebih

rendah tetapi produk memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi. Fraksi karbon tetap yang terdapat dalam sampel mengalami peningkatan sedangkan hidrogen dan oksigen akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur torefaksi.

- b. Tingkat Pemanasan & *Residence time*. Laju pemanasan yang lambat berarti biomassa dipanaskan dengan waktu yang lebih lama. Durasi waktu torefaksi pada temperatur torefaksi disebut dengan "*Residence time*". *Residence time* yang lebih lama akan menghasilkan massa yang lebih rendah serta kepadatan energi yang lebih tinggi. Tidak seperti temperatur, *residence time* pada produk torefaksi tidak terlalu berpengaruh dominan.
- c. Jenis Biomassa, parameter selanjutnya yang mempengaruhi hasil torefaksi yaitu jenis biomassa. Kandungan hemiselulosa pada biomassa kayu dapat berbeda-beda berdasarkan jenis kayu yaitu kayu lunak dan kayu keras. Jenis kayu keras akan melepaskan sebagian besar asam asetat dan air, sedangkan kayu lunak akan melepaskan sebagian besar asam format selama proses torefaksi. Hal tersebut dikarenakan jenis kayu keras mengalami kehilangan massa yang lebih tinggi pada torefaksi tanpa banyak berpengaruh pada kehilangan energi dibandingkan dengan jenis kayu lunak.
- d. Ukuran Sampel, ukuran partikel atau potongan biomassa merupakan parameter lain yang dapat mempengaruhi hasil torefaksi. Efek ini dapat diukur untuk ukuran partikel yang besar. Ukuran serta bentuk partikel maupun ukuran sampel biomassa

akan mempengaruhi laju perpindahan panas dari luar biomassa hingga ke bagian dalam biomassa. Temperatur dan *residence time* yang sama dengan ukuran partikel pada proses torefaksi, biomassa yang memiliki ukuran sangat kecil akan lebih mudah terdekomposisi secara termal dibandingkan dengan ukuran biomassa yang lebih besar (Irawan dkk, 2015).

2.4.3 Kualitas Produk Torefaksi

Produk torefaksi secara berupa padatan (*char*) dan sebagian gas. Menurut Tumuluru tahun 2010 produk torefaksi dari biomassa kayu idealnya menghasilkan 82% wt produk padatan (*char*). Beberapa penelitian lain menunjukkan produk selain padatan dan gas, tetapi terdapat tar hasil produk torefaksi. Tar ialah cairan yang muncul akibat adanya kondensasi gas hasil pirolisis biomassa karena perbedaan temperatur yang tinggi (Suwandono, 2015). Kualitas produk torefaksi tidak hanya dinilai dari berkurangnya massa produk torefaksi, karena pengurangan massa belum tentu meningkatkan kepadatan energi. Pengurangan massa yang terlalu ekstrim dapat menurunkan kepadatan energi dari produk torefaksi. Kualitas produk torefaksi diidentifikasi dengan beberapa parameter yaitu (Basu, 2013):

- a. *Mass yield* (MY) merupakan fraksi massa asli biomassa yang tersisa dari hasil torefaksi. *Mass yield* ditentukan dengan dua perlakuan yaitu kehilangan massa karena pengeringan dan kehilangan massa karena torefaksi. *Mass yield* akibat torefaksi dapat diartikan bahwa fraksi dari komponen organik asli biomassa

yang diubah menjadi arang, dan harus ditentukan dengan kondisi “*dry ash free*” (daf). Sedangkan produk torefaksi dari biomassa yang memiliki kandungan anorganik tinggi memiliki jumlah total padatan mencakup abu, maka pada kondisi “*dry base*” (db). Selain dua kondisi tersebut, terdapat kondisi lain yang dapat menentukan kondisi material secara menyeluruh “*as-received*” (ar).

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

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

$$MY_{ar} = \frac{mf_{ar}}{mo} \quad \dots (3)$$

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. *Energy Density* merupakan parameter lain dari produk torefaksi. Parameter ini memberikan jumlah energi yang dilepaskan ketika

satuan massa produk dibakar. *Energy density* dikenal dengan istilah nilai kalor.

$$\begin{aligned} \text{Energy density} &= \text{jumlah energi yang dilepaskan} \\ &\quad \text{satuan massa dari biomassa} \\ &\quad \text{torefaksi sepenuhnya terbakar} \\ &= \text{HHV} \end{aligned}$$

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:

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

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

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

2.4.4 Jenis-jenis Reaktor Torefaksi

Saat ini penelitian mengenai torefaksi semakin berkembang, perkembangan ini menciptakan tipe-tipe reaktor torefaksi yang berbeda. Berikut merupakan tipe-tipe reaktor torefaksi.

1. Reaktor tipe *fixed bed*, karakteristik reaktor tipe ini adalah laju pemanasan yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas

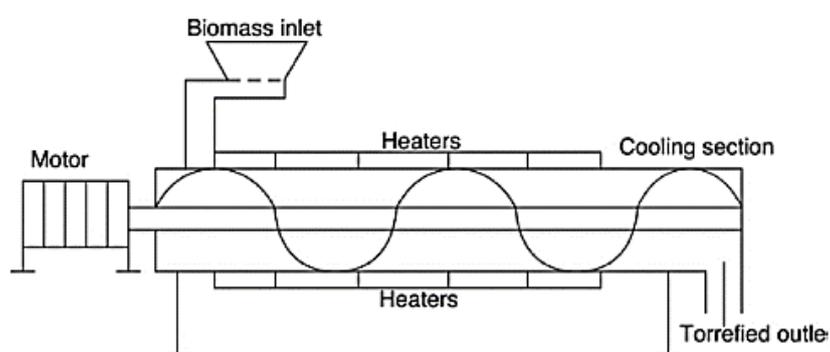
yang terjadi rendah. Reaktor *fixed bed* umumnya digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi kandungan produk yang akan di torefaksi.

2. 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.
3. Reaktor tipe *rotary kiln*, reaktor ini memiliki putaran yang lambat dari tempat pembakaran (*kiln*) sehingga memungkinkan pencampuran material sangat baik dalam reaktor. Kelebihan reaktor ini yaitu *heating rate* tidak lebih tinggi 100°C/menit dan *residence time* hingga satu jam.
4. Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle (COMB)*, merupakan torefaksi dengan struktur pengering yang memiliki banyak elemen yakni *burner, combustion chamber, feeder, cyclone, multy stage dry condenser, ID fan (suction flow)*, dan *control panel*. Torefaksi ini mengklaim mampu melakukan torefaksi secara singkat dalam waktu 3-5 menit dengan kapasitas 20 kg/jam (Sulistio dkk, 2020).

2.4.5 Reaktor Torefaksi Tipe Tubular

Reaktor jenis *tubular* adalah jenis reaktor yang mempunyai bentuk tabung dengan dinding tetap, sedangkan yang bergerak yaitu material didalam reaktor. Pada umumnya reaktor tubular dipanaskan menggunakan sistem panas eksternal. Dalam beberapa kasus bahan baku di dalam

material bergerak dengan sistem *screw conveyor*, reaktor bujur sangkar yang material digerakan dengan sistem *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Keuntungan dari reaktor jenis tubular ini yaitu; reaktor berjalan secara kontinyu, reaktor terbebas dari kebocoran, mempunyai permukaan perpindahan panas yang besar, dan sintetik gas yang mudah bereformasi. Reaktor tipe ini mudah untuk dirancang jika koefisien perpindahan panas nya diketahui karena sederhana dan aman. Ciri khas dari reaktor tubular adalah *screw conveyor reaktor* dengan operasional serta biaya konstruksi yang rendah. Pada desain ini, kecepatan sekrup dapat bervariasi yaitu dari 0,5–25 rpm, sehingga *residence time* reaktor dapat diubah. Sistem reaktor ini berguna untuk termal yang baik dan *catalytic cracking* yang berasal dari limbah plastic. Pada skala kecil dan menengah, reaktor tubular dapat kompetitif. Temperatur operasi tergantung dari pilihan produk. Skema torefaksi tipe tubular jenis *screw reactor* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Reaktor tipe tubular jenis *screw reactor*.

(Basu, 2018)

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*



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

Reaktor	
Diameter Screw	: 195 mm
Diameter tabung dalam	: 203,2 mm
Diameter tabung luar	: 254,0 mm
Panjang reaktor	: 1600 mm
Tinggi reaktor	: 1700 mm
Jarak Pitch	: 100 mm
Diameter poros	: 50 mm
Kecepatan Putar	: 0,5 rpm
Kapasitas maksimum	: 5 kg/jam
Sistem Penggerak	
<i>Electromotor</i>	: 2 unit @ 2 dan 0,5 Hp
<i>Ratio gear Reducer</i>	: 2 unit @ 1 : 60
Medium Pemanas	
Jenis medium pemanas	: <i>Heat Trasfer Oil CaflorTMAF</i>
Merk medium pemanas	: <i>Petro Canada</i>
Temperatur Maksimum	: 375 °C
Tekanan kerja	: 1 atm
Sistem Pembakaran	
Ruang Bakar	: <i>Horizontal Burner</i>
Bahan Bakar	: <i>Liquefied Petroleum Gas (LPG)</i>
Sistem Kontrol Temperatur	
Sensor temperatur	: <i>Thermocouple Tipe K</i>
Sistem Pendingin Cooling Char	
Sistem Sirkulasi Air	: <i>Water Pump</i>

2. 12 Channel Temperature Recorder Datalogger

12 Channel Temperatur Recorder Datalogger memiliki tampilan pada fungsi sebagai alat ukur temperatur yang dapat merekam data sampling sebanyak 1 sampai 3600 detik dengan keluaran data excel secara otomatis. Alat instrument dapat terhubung dengan 12 channel thermocouple probe tipe J/T/E/R/S dengan resolusi 0,1°C/1°C, 0,1°F/1°F.



Gambar 3.2 12 channel temperature recorder datalogger.

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

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Pelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.), seperti Gambar 3.3.



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

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) sampel dilakukan perlakuan torefaksi variasi temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°C dengan *residence time* adalah 30 menit. Massa dari masing-masing sampel mentah adalah 200 – 300 gram. Rancangan penelitian ini dengan mengamati beberapa parameter seperti nilai kalor, *ultimate* dan *proximate*.

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 conveyor.
5. Menyalakan api burner dengan mengatur katup pada regulator LPG.
6. Menunggu temperatur T1, T2, T3 mencapai temperatur yang diinginkan.
7. Menjaga temperatur T1, T2, T3 apabila sudah mencapai temperatur 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 temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°C.

Catatan: menjaga temperatur torefaksi dengan mengatur bukaan katup regulator.

3.4 Parameter Penelitian Karakteristik Bahan Bakar Padat

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 temperatur, parameter utama digunakan untuk mendapatkan parameter temperatur optimal pada proses torefaksi sampel chip. Biomassa yang digunakan adalah pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) yang berukuran panjang mm dan lebar mm.

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, MY (*mass yield*) dan perolehan energinya, EY (*energy yield*).

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut

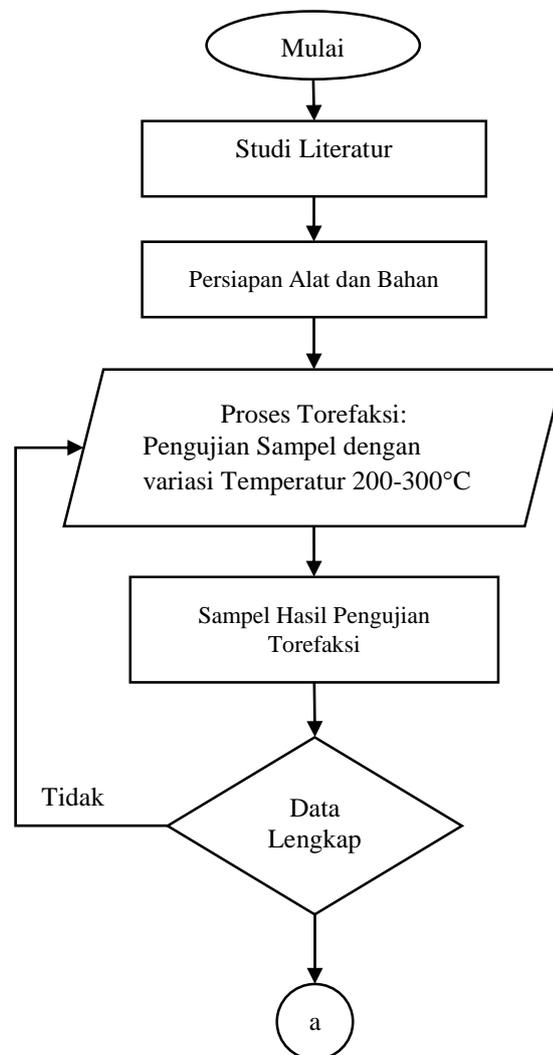
- Studi Literatur: tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Dimulai dengan mempelajari tentang torefaksi, biomassa, reaktor torefaksi, mekanisme torefaksi, dan karakteristik bahan bakar padat.
- Persiapan Alat torefaksi: persiapan perlengkapan alat-alat utama reaktor serta alat pendukung 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 temperatur torefaksi yakni 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°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

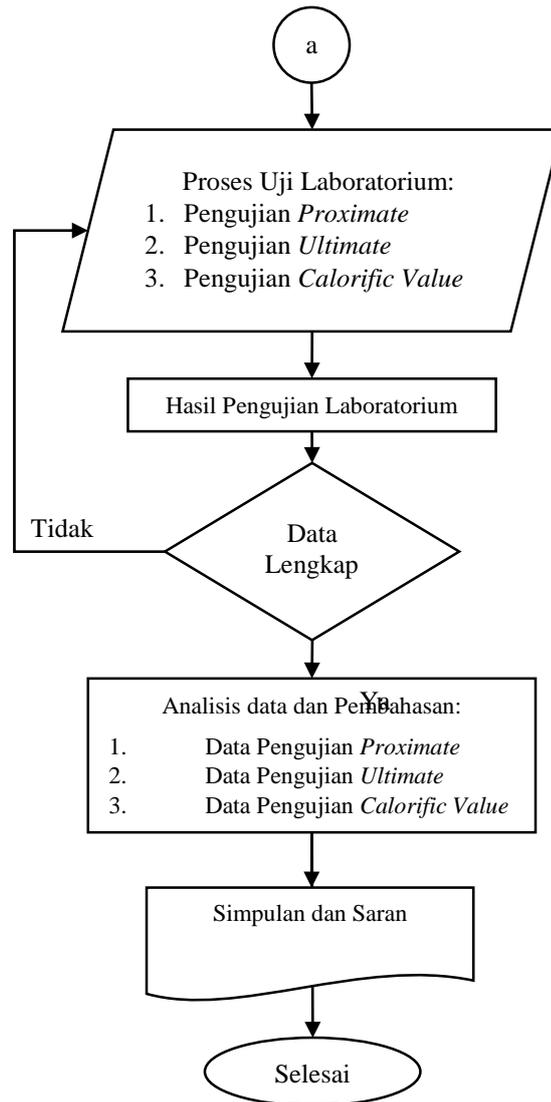
hasil laboratorium. Analisis data meliputi analisis *proximate*, analisis *ultimate* dan *Calorific Value*.

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

3.6 Alur Tahapan Penelitian

Berikut merupakan *flowchart* alur penelitian pada Gambar 3.4 dibawah.





Gambar 3.4 Diagram alur penelitian.

3.7 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2023 sampai dengan bulan Juni 2023. Lokasi pelaksanaan proses torefaksi dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Unila kemudian dilakukan pengujian nilai kalor dan analisis *proximate* di Laboratorium Analisis dan Instrumentasi

Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung, dan juga dilakukan analisis *ultimate* di Laboratorium Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Proses torefaksi dengan variasi temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°C dapat meningkatkan nilai kalor sampel pelepah sawit. Nilai kalor tertinggi terdapat pada produk hasil torefaksi dengan variasi temperatur 300°C dengan nilai kalor sebesar 6202,90 kkal/kg. Peningkatan nilai kalor terbesar terjadi pada temperatur 250°C menuju 275°C sebesar 1017,2 kkal/kg. Nilai kalor terendah terdapat pada produk hasil torefaksi dengan variasi temperatur 200°C dengan nilai kalor sebesar 4535,38 kkal/kg.
2. Proses torefaksi sampel biomassa pelepah sawit dengan variasi temperatur 200°C, 225°C, 250°C, 275°C dan 300°C mempengaruhi hasil uji *proximate* dari sampel tersebut. Proses torefaksi mengakibatkan peningkatan persentase *Fixed Carbon* (FC) dan penurunan persentase *Volatile Matter* (VM) seiring dengan variasi temperatur torefaksi yang digunakan. Hasil pengujian *proximate* pada sampel pelepah sawit variasi temperatur 275°C persentase kandungan FC yang dihasilkan sebesar 16,06%. Kandungan FC meningkat dari kandungan FC sampel mentah sebesar 15,68%. Kandungan VM produk hasil torefaksi yang dihasilkan

meningkat sebesar 70,97% dibandingkan dengan kandungan sampel mentah sebesar 67,17%.

3. Proses torefaksi mempengaruhi hasil analisis *ultimate* sampel pelepah sawit. Berdasarkan analisis *ultimate*, kandungan karbon (C) meningkat secara signifikan, Sementara kandungan Oxygen (O) dan hidrogen (H) menurun sehingga rasio H/C dan O/C juga ikut menurun.
4. Proses torefaksi mempengaruhi perolehan massa (*Mass Yield*) dan energi (*Energy Yield*). Peningkatan temperatur torefaksi mengakibatkan penurunan *mass yield* dan *energy yield* untuk produk torefaksi sampel biomassa pelepah sawit yang berbeda di masing-masing temperatur.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait preparasi sampel pelepah sawit menjadi ukuran yang seragam, untuk mendapatkan bahan bakar produk torefaksi yang maksimal. Hal ini dimaksudkan agar dapat menjadi suatu perbandingan dengan hasil penelitian yang telah didapat dan mengetahui apakah sampel pelepah dengan ukuran sampel yang seragam akan mendapatkan hasil nilai kalor ataupun karakteristik biomassa pelepah sawit hasil torefaksi menjadi lebih baik.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait uji laboratorium untuk cairan Tar, terkait kandungan atau komposisi pada cairan tersebut agar cairan tar tersebut dapat menjadi produk yang dapat dimanfaatkan.

3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait dilakukan variasi *residence time* dengan temperatur torefaksi yang sama untuk mengetahui pengaruh perbedaan waktu tinggal pada proses torefaksi terhadap nilai kalor dan karakteristik pada biomassa torefaksi pelepah sawit.
4. Perlu adanya validasi hasil pengujian yang telah didapat pada uji laboratorium, dikarenakan pada hasil pengujian yang didapat ada beberapa kandungan yang tidak sesuai dengan teori yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

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, dan Amrizal. (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>
- Apriyanto, A., dan Thohirin, M. (2022). Kaji Eksperimental Konversi Biomassa Sampah Menjadi Bahan Bakar Terbarukan Menggunakan Proses Torefaksi. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 7(1), 42–52. <https://doi.org/10.24967/teksis.v7i1.1593>
- Aulia, A., Farid, F., dan Zahar, W. (2021). *Korelasi Parameter Analisis Proximate dan Analisis Ultimate 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*.
- Nugroho, A., Sangko, M. N., dan Wijayanti, W. (2018). Pengaruh Temperatur Terhadap Entalpi dan Kinetik Rate Gas Pirolisis Kayu Mahoni. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1), 61–67.
<https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.01.9>
- 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. *jom FTEKNIK*, 1(1), 1–14.
- 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.