

**PENGARUH TOREFAKSI KULIT KAKAO TERHADAP KARAKTERISTIK
BAHAN BAKAR PADAT DENGAN VARIASI TEMPERATUR
MENGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR**

(Skripsi)

Oleh:

**RIFQI FAUZAN HAKIM
NPM 1915021025**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**PENGARUH TOREFAKSI KULIT KAKAO TERHADAP KARAKTERISTIK
BAHAN BAKAR PADAT DENGAN VARIASI TEMPERATUR
MENGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR**

Oleh

**RIFQI FAUZAN HAKIM
NPM 1915021025**

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas**



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PENGARUH TOREFAKSI KULIT KAKAO TERHADAP KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR PADAT DENGAN VARIASI TEMPERATUR MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR

Oleh

Rifqi Fauzan Hakim

Konsumsi batubara sebagai sumber energi utama di Indonesia semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi. Salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang melimpah di Indonesia serta dapat mengurangi konsumsi batubara adalah biomassa. Biomassa menjadi alternatif untuk mensubstitusi batubara karena dapat mereduksi emisi gas rumah kaca. Biomassa dari limbah kulit kakao dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat biomassa karena produksinya melimpah sepanjang tahun. Komposisi limbah kulit kakao adalah 75% dalam buah kakao yang memiliki nilai kalor cukup tinggi. Kadar air yang tinggi pada kulit kakao perlu diturunkan melalui proses termal yang dapat meningkatkan kualitasnya yaitu torefaksi. Penelitian ini menggunakan biomassa kulit kakao berbentuk *chip* dengan *range* ukuran 1-2cm. Penelitian ini dilakukan pada temperatur 250, 275 dan 300 °C dengan waktu tinggal selama 30 menit. Reaktor torefaksi yang digunakan adalah tipe kontinu tubular dengan pemanas LPG. Torefaksi limbah kulit kakao menghasilkan nilai kalor kulit kakao tertinggi pada temperatur 275 °C, yaitu sebesar 6662 kkal/kg dengan peningkatan sebesar 57% dari nilai kalor kulit kakao mentah. Sedangkan pada temperatur 250 dan 300 °C meningkatkan nilai kalor sebesar 20% dan 48% dari nilai kalor kulit kakao mentah. Kenaikan temperatur operasi berbanding lurus dengan penurunan *mass yield*. Torefaksi kulit kakao pada temperatur operasi 250°C tersimpan *energy yield* terbesar sebesar 94%. Temperatur operasi yang lebih tinggi mempengaruhi penurunan persentase kandungan air dan volatil, serta peningkatan persentase abu dan karbon tetap. Torefaksi dapat meningkatkan karakteristik limbah kulit kakao sebagai bahan bakar mendekati batubara, terbukti dengan menurunnya perbandingan rasio atom H/C dan O/C.

Kata Kunci : Biomassa, Torefaksi, Kulit Kakao, Nilai Kalor.

ABSTRACT***EFFECT OF COCOA SHELL TOREFACTION ON SOLID FUEL CHARACTERISTICS WITH TEMPERATURE VARIATION USING A TUBULAR TYPE CONTINUOUS REACTOR***

By

Rifqi Fauzan Hakim

Coal consumption as the main energy source in Indonesia is increasing along with the increasing energy demand. One of the new and renewable energy sources that is abundant in Indonesia and can reduce coal consumption is biomass. Biomass is an alternative to substitute coal because it can reduce greenhouse gas emissions. Biomass from cocoa shell waste can be utilized as biomass solid fuel because of its abundant production throughout the year. The composition of cocoa shell waste is 75% of the cocoa fruit, which has a high calorific value. The high moisture content of cocoa shells needs to be reduced through a thermal process that can improve its quality, namely torrefaction. This study used chip-shaped cocoa shell biomass with a size range of 1-2 cm. This study was conducted at temperatures of 250, 275 and 300 °C with a residence time of 30 minutes. The torrefaction reactor used is a tubular continuous type with LPG heater. Torrefaction of cocoa shell waste produced the highest calorific value of cocoa shells at 275 °C, which amounted to 6662 kcal/kg with an increase of 57% from the calorific value of raw cocoa shells. While at temperatures of 250 and 300 °C, the calorific value increased by 20% and 48% of the calorific value of raw cocoa shell. The increase in operating temperature is directly proportional to the decrease in mass yield. Cocoa shell torrefaction at an operating temperature of 250°C saved the largest energy yield of 94%. Higher operating temperatures decreased the percentage of water and volatiles, and increased the percentage of ash and fixed carbon. Torrefaction can improve the characteristics of cocoa shell waste as a fuel close to coal, as evidenced by the decrease in the ratio of H/C and O/C atoms.

Keywords: Biomass, Torrefaction, Cocoa Shells, Calorific Value.

Judul Skripsi

**PENGARUH TOREFAKSI KULIT KAKAO
TERHADAP KARAKTERISTIK BAHAN
BAKAR PADAT DENGAN VARIASI
: TEMPERATUR MENGGUNAKAN
REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR**

Nama Mahasiswa

: **Rifqi Fauzan Hakim**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1915021025

Program Studi

: Strata 1 (S1)

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

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

Hadi Pravitno. S.T., M.T.
NIP. 19880514 201903 1 012

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

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

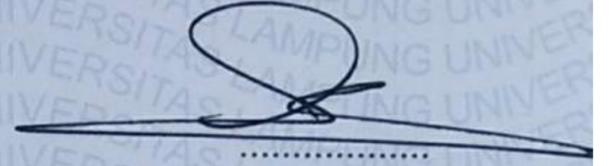
Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

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

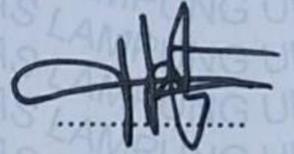
MENGESAHKAN

1. **Tim Penguji**

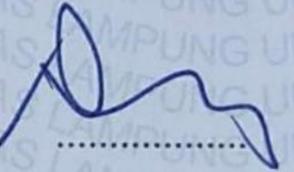
Ketua : Dr. Amrul, S.T., M.T.



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



Penguji Utama : Ir. Herry Wardono, M.Sc., IPM., ASEAN Eng



2. **Dekan Fakultas Teknik**



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 31 Juli 2023

LEMBAR PERNYATAAN

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

Bandar Lampung, 16 Agustus 2023

Pembuat Pernyataan



Rifqi Fauzan Hakim

NPM 1915021025

MOTO

*“Kesuksesan tidak akan tercapai tanpa rasa letih
dan perjuangan”*

Rifqi Fauzan Hakim–

*“Jangan kasahi dirimu, jika kau mengasahi
dirimu hidupmu akan terus dibayang–bayangi
mimpi buruk”*

Dazai Osamu–

*“...Allah tidak membebani seseorang itu
melainkan sesuai dengan kesanggupannya...”*

Q.S. Al–Baqarah: 286–

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh.

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T karena berkat anugerah dan rahmat- Nya penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam pula tak lupa penulis hatur agungkan kepada nabi akhir zaman Rasulullah Muhammad SAW yang telah membimbing manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh hidayah. Skripsi ini penulis buat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan dalam ilmu di bidang energi khususnya energi terbarukan biomassa. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T.,M.Sc., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Herry Wardono, M.Sc., IPM., ASEAN Eng. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi dan memberikan masukan serta saran kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.

7. Seluruh Dosen di Jurusan 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. Kepada Bapak Haniful Lukman Hakim dan Ibu Idah Hamidah selaku Orang Tua tersayang yang selalu menyemangati, mendukung dalam segi apapun, memotivasi dan mendoakan penulis setiap waktu.
10. Bekti Maulana Hakim dan Ibra Febriansyah Hakim selaku adik penulis yang selalu bersikap dewasa dan semangat belajar yang tinggi untuk menyelesaikan studi masing-masing.
11. Seluruh tim torefaksi yang selalu menemani dan memberikan bantuan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi.
12. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Unila Angkatan 2019 yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.

Penulis sangat bersyukur kepada Allah S.W.T karena telah diberikan dan dipertemukan oleh orang-orang baik yang membantu penulis dalam proses perkuliahan untuk menyelesaikan skripsi dan semoga Allah S.W.T membalas kebaikannya serta selalu diberkati dan dilindungi oleh-Nya. Penulis juga menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini, dan sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatuallahi Wabarokatuh.

Bandar Lampung, Agustus 2023

Rifqi Fauzan Hakim
NPM. 1915021025

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Kota Tasikmalaya, Provinsi Jawa Barat pada tanggal 13 Januari 2001, penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Haniful Lukman Hakim dan Ibu Idah Hamidah. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN KEDALEMAN IV CILEGON hingga tahun 2013, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMPN 5 CILEGON yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu melanjutkan ke pendidikan tingkat atas di SMKN 1 CILEGON yang diselesaikan pada tahun 2019, hingga pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif menjadi anggota di beberapa organisasi kampus antara lain, Anggota aktif Unila Robotika 2020 (URO), Ketua Umum *Languages Learning Club* 2020 (LLC) Ketua Bidang Edukasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin 2021 (HIMATEM). Selain itu penulis juga mengikuti beberapa kegiatan lainnya seperti, Lomba KRTI 2020, Program Kredensial Mikro Mahasiswa Indonesia 2021 (KMMI), dan Program Pertukaran Pelajar dengan Kampus ITERA 2021.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. Hino Motors Manufacturing Indonesia pada tahun 2022 dengan judul laporan “**IMPLEMENTASI KAIZEN DENGAN REVERSE ENGINEERING PADA MEJA KERJA MESIN PRESS SEAL HOUSING DI PT. HINO MOTORS MANUFACTURING INDONESIA**”.

Tahun 2022 penulis tergabung dalam tim penelitian torefaksi dengan judul penelitian “**PENGARUH TOREFAKSI KULIT KAKAO TERHADAP KARAKTERISTIK BAHAN PADAT DENGAN VARIASI TEMPERATUR MENGGUNAKAN REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR**”. Di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	ii
SANWACANA	viii
RIWAYAT HIDUP	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR NOTASI.....	xvii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Biomassa	7
2.2 Kulit Kakao	11
2.3 Karakteristik Bahan Bakar	12
2.4 Torefaksi	15
2.4.1 Mekanisme Torefaksi	18
2.4.2 Parameter Operasi Torefaksi	21
2.4.3 Kualitas Produk Torefaksi	22

2.4.4	Jenis-Jenis Reaktor Torefaksi	24
2.4.5	Reaktor Torefaksi Tipe Tubular	27
III.	METODE PENELITIAN	28
3.1	Alat dan Bahan.....	28
3.2	Rancangan Penelitian.....	31
3.3	Prosedur Torefaksi Biomassa	31
3.4	Tahapan Penelitian.....	34
3.5	Tempat dan Waktu Penelitian.....	35
3.6	Diagram Alir Penelitian	35
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1	Perubahan Visual	38
4.2	Nilai Kalor	40
4.3	Mass Yield, Energy Yield dan Energy Density	44
4.4	Analisis Proksimat	47
4.5	Analisis Ultimat	50
4.6	Rasio O/C dan H/C	51
V.	PENUTUP	55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA	58
	LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur dinding sel tumbuhan	11
Gambar 2.2 Diagram <i>van krevelen</i>	14
Gambar 2.3 Perbedaan biomassa mentah dan produk torefaksi biomassa.....	16
Gambar 2.4 Tahapan proses torefaksi	18
Gambar 2.5 Tahap kehilangan berat biomassa saat torefaksi	19
Gambar 2.6 Reaksi komponen biomassa saat torefaksi	20
Gambar 2.7 <i>Rotary drum reactor</i>	26
Gambar 2.8 <i>Microwave reactor</i>	26
Gambar 2.9 Layout reaktor tipe tubular atau <i>screw</i>	27
Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas <i>oil jacket</i>	28
Gambar 3.2 <i>12 Channel temperatur recorder datalogger</i>	30
Gambar 3.3 Sampel biomassa kulit kakao (<i>chip</i>).....	30
Gambar 3.4 Diagram alir penelitian.....	37
Gambar 4. 1 Perubahan visual sampel mentah kulit kakao dan setelah torefaksi.	39
Gambar 4. 2. Grafik nilai kalor sampel mentah dan produk torefaksi.	40
Gambar 4. 3 Produk torefaksi kulit kakao temperatur operasi 250 °C.....	41
Gambar 4. 4 Produk torefaksi kulit kakao temperatur operasi 275 °C.....	42
Gambar 4. 5 Produk torefaksi kulit kakao temperatur operasi 300 °C.....	42
Gambar 4. 6 <i>Mass yield</i> dan <i>energy yield</i> produk torefaksi kulit kakao.....	44

Gambar 4. 7 Hasil perhitungan <i>energy density</i>	46
Gambar 4. 8 Hasil pengujian proksimat.....	48
Gambar 4. 9 Hasil pengujian ultimat.	50
Gambar 4. 10 Diagram <i>van krevelen</i>	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik bahan bakar kulit kakao mentah.....	15
Tabel 3. 1 Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular	29
Tabel 4. 1 Rasio O/C dan H/C.	52
Tabel 4. 2 Hasil produk torefaksi kulit kakao.	53

DAFTAR NOTASI

MY : *Mass Yield* (%)

EY : *Energy Yield* (%)

ED : *Energy Density*

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”* (kg)

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

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

mo : *Massa total biomassa mentah* (kg)

$HHVo$: *Nilai kalor biomassa mentah* (kkal/kg)

$HHVf$: *Nilai kalor produk torefaksi biomassa* (kkal/kg)

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cadangan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama di Indonesia semakin berkurang seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi. Salah satu bahan bakar fosil yang banyak digunakan adalah batubara. Pada tahun 2015-2019 penggunaan batubara sebagai masukan energi di Indonesia mencapai 70-75% dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya (Faizah, 2022). Jika hal ini terus dilakukan maka cadangan bahan bakar fosil semakin lama akan semakin habis, oleh karena itu diperlukan suatu usaha untuk mencari sumber-sumber energi terbarukan yang dapat mengurangi konsumsi batubara.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan-bahan biologis, dan kebanyakan bahan yang dimanfaatkan sebagai sumber biomassa adalah sampah/limbah. Biomassa menjadi solusi yang tepat untuk mengantisipasi kelangkaan energi. Keunggulan penggunaan biomassa sebagai energi terbarukan selain berasal dari alam, antara lain penggunaannya lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar dari fosil (Laondi, 2021). Oleh karena itu biomassa dapat dianggap sebagai solusi sumber energi karena relatif murah (terutama bila berasal dari limbah pertanian atau kayu) dan tersedia secara luas (Hidayat dkk., 2020).

Tanaman kakao (*Theobroma cacao* L.) adalah salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah. Pada tahun 2022 produksi tanaman kakao di Lampung sebesar 53.991 ton (BPS Indonesia, 2022). Komponen limbah buah kakao yang terbesar berasal dari kulit buahnya atau biasa disebut pod kakao, yaitu sebesar 75% dari total buah (Kusuma dkk., 2019). Sehingga sekitar 40 ribu ton merupakan limbah kulit kakao yang dapat dihasilkan di Lampung pada tahun 2022.

Biomassa mulai banyak dimanfaatkan sebagai bahan pakan ternak, pupuk tanaman, maupun energi terbarukan. Biomassa juga memainkan peranan penting dalam pemenuhan energi terbarukan di Indonesia dengan menjadikannya sebagai bahan bakar *co-firing* pada PLTU karena *co-firing* batubara dan biomassa berpotensi menurunkan emisi CO₂, NO_x dan Sox (Tanbar dkk., 2021). Saat ini, teknologi *co-firing* telah diterima secara luas untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi yang sesuai di pembangkit listrik tenaga panas dengan mengganti sebagian bahan bakar fosil dengan biomassa. Namun porsi biomassa dalam campuran tersebut dibatasi hingga 5-10%. Persentase yang lebih tinggi tidak layak secara ekonomi kecuali sifat-sifat biomassa ditingkatkan (Nhuchhen dkk., 2014). Oleh karena itu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan sifat-sifat biomassa agar mendekati karakteristik batubara adalah melalui salah satu proses metode termal yaitu torefaksi.

Torefaksi adalah proses pirolisis pada temperatur relatif rendah, yaitu antara 200-300 °C di bawah kondisi tanpa udara. Laju pemanasan pada proses torefaksi biasanya tidak lebih dari 50 °C/menit dengan lama waktu antara 10-240 menit. Metode ini diketahui sebagai cara yang efektif untuk meningkatkan sifat-sifat biomassa. Proses torefaksi biomassa tergantung pada beberapa parameter operasional, yang meliputi jenis biomassa, temperatur torefaksi, waktu torefaksi, dan ukuran partikel biomassa. (Surono dan Hutomo, 2021).

Salah satu penelitian tentang torefaksi yang dilakukan oleh Amrul dkk. (2018), untuk meningkatkan nilai kalor dengan memanfaatkan campuran sampah biomassa (nasi, kulit jeruk, kulit pisang dan didominasi oleh daun-daun yang berserakan) dengan variasi temperatur kerja dari reaktor antara lain 225, 250, 275, 300 dan 325 °C. Penelitian ini meningkatkan nilai kalor sebesar 14% menjadi 5425 kkal/kg. Selain itu kandungan karbon juga meningkat sebesar 27% menjadi 48%. Hal ini membuktikan bahwa torefaksi dapat meningkatkan sifat-sifat biomassa agar mendekati karakteristik batubara.

Berdasarkan uraian di atas, limbah kulit kakao memiliki potensi sebagai energi terbarukan yang dapat ditingkatkan sifat-sifatnya agar mendekati karakteristik batubara dengan melalui proses termal torefaksi. Oleh karena itu dilakukan penelitian tentang pengaruh proses torefaksi limbah kulit kakao terhadap karakteristik bahan bakar padat dengan variasi temperatur 250, 275, 300 °C menggunakan reaktor torefaksi tipe tubular sistem pemanas *oil jacket* di

Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung. Penelitian ini diharapkan mampu mengurangi penggunaan batubara dengan mencampurkan produk torefaksi dalam proses pembakaran PLTU.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian torefaksi kulit kakao antara lain sebagai berikut:

1. Perubahan karakteristik bahan bakar padat yang dimiliki produk torefaksi biomassa kulit kakao terhadap variasi temperatur operasi

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian torefaksi kulit kakao memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik produk torefaksi kulit kakao berupa nilai kalor, serta analisis proksimat dan ultimat yang dipengaruhi variasi temperatur operasi
2. Mengetahui karakteristik produk torefaksi kulit kakao berupa *mass yield*, *energy yield*, dan *energy density* dipengaruhi oleh variasi temperatur operasi.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan sampel biomassa kulit kakao berbentuk chip kecil yang tidak seragam dengan dimensi sekitar 1-2 cm.

2. Proses torefaksi sampel dilakukan dengan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket*.
3. Parameter utama penelitian ini adalah variasi temperatur operasi torefaksi sebesar 250, 275, 300 °C.
4. Parameter waktu tinggal proses torefaksi adalah 30 menit.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini yaitu sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian latar belakang dari penelitian ini, kemudian tujuan dilakukannya penelitian ini, lalu pemberian batasan masalah agar hasil penelitian lebih terarah, serta sistematika penulisan yang digunakan pada penulisan laporan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori-teori dasar seperti: pengertian biomassa, sampel kulit kakao, penjelasan torefaksi, serta beberapa karakterisasi bahan bakar padat yang bermaksud untuk menunjang penelitian ini.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan alat dan bahan penelitian yang digunakan, tempat dan waktu penelitian yang akan dilakukan, serta alur tahapan pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil pengujian 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

Biomassa adalah bahan yang berasal dari makhluk hidup, termasuk tanaman, hewan dan mikroba. Contoh biomassa meliputi pohon, tanaman produksi dan residu serat-serat tanaman, limbah hewan, limbah industri dan limbah-limbah lain yang berupa bahan organik (Laondi, 2021). Biomassa merupakan sumber energi terbarukan dan didefinisikan sebagai produk organik dari pertanian, perkebunan dan kehutanan yang dikembangkan untuk bahan bakar, dari limbah dan fasilitas pengolahan limbah. Biomassa dapat dihasilkan secara langsung sebagai produk atau limbah dari pengolahan hasil perkebunan atau kehutanan (Yulianto dkk., 2020).

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya biomassa terbesar dibandingkan negara lain, potensinya apabila dikembangkan adalah 50 Giga Watt (GW), Selain itu Indonesia memproduksi 146,7 Juta ton atau setara 470 Giga Joule (GJ) biomassa per-tahun yang mana sumber utamanya berasal dari residu pertanian yaitu sebesar 150 GJ per-tahun dan karet kayu 120 GJ per-tahun (Adja dan Anam, 2021).

Menurut Adja dan Anam (2021), biomassa memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan sebagai berikut:

1. Dapat disimpan pada jangka waktu yang lama.
2. Dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas dan daya (CHP) sehingga efisiensinya tinggi.
3. Teknologinya fleksibel, sehingga baik untuk diaplikasikan pada skala kecil, sedang, ataupun besar.
4. Lebih efisien jika sumber energi dan tempat pemanfaatannya berjarak dekat.
5. Untuk beberapa teknologi pada prosesnya masih menghasilkan bau.
6. Perlu gas pembersih/cleaning.
7. Abu yang dihasilkan cukup tinggi sehingga pemeliharaan peralatan lebih sering dilakukan.
8. Peralatan untuk proses gasifikasi, pirolisis, dan cogeneration masih terbatas.

Biomassa dapat digunakan sebagai bahan baku untuk bahan bakar cair atau gas untuk sektor transportasi melalui jalur termokimia dan biologi, dan karena itu dianggap sebagai sumber energi terbarukan yang menjanjikan. Penggunaan biomassa secara tradisional hanya terbatas untuk tujuan memasak dan pemanasan, yang telah menyebabkan dampak buruk seperti degradasi lahan dan penggurunan. Namun, penggunaan biomassa modern – pembawa energi berkualitas tinggi yang diubah dari biomassa mentah – untuk listrik, dan produksi panas dapat secara substansial mengurangi emisi dari pembangkit

listrik konvensional (Nhuchhen dkk., 2014). Energi biomassa dapat menjadi solusi bahan bakar pembangkit energi yang sebelumnya tidak dapat diperbaharui dan mencemari lingkungan. Bahan penghasil energi biomassa diklasifikasikan menjadi dua jenis, yang pertama berasal dari hewan berupa mikroorganisme atau makro organisme, dan yang kedua berasal dari tanaman seperti sisa tanaman atau pemupukan tanaman secara langsung. Energi biomassa berasal dari siklus karbon bumi. Hal ini terlihat dari sebagian besar unsur kehidupan, mulai dari tumbuhan hingga hewan hingga manusia, memiliki unsur karbon yang intinya terus berputar. Oleh karena itu, biomassa sendiri dapat ditingkatkan menjadi bahan bakar karena juga mengandung unsur karbon (Laondi, 2021).

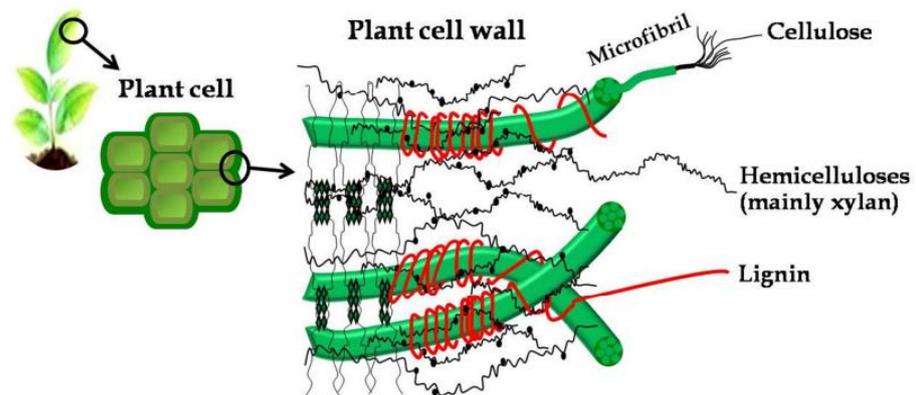
2.1.1 Struktur Lignoselulosa Biomassa

Biomassa dapat berupa bahan lignoselulosa atau nonlignoselulosa. Bahan lignoselulosa merupakan bagian tumbuhan non-pati dan berserat yang sebagian besar terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Konversi biomassa lignoselulosa yang efisien membutuhkan pemahaman yang lebih baik tentang struktur dinding sel dan komposisinya. Gambar 2.1 memperlihatkan dinding sel tumbuhan, yang terdiri dari empat komponen makro utama yaitu dinding primer, dinding sekunder, membran plasma, dan lamela tengah, terbuat dari komponen polimer sebagai berikut:

- a. Selulosa, adalah polimer rantai panjang glukosa yang dapat membentuk ikatan hidrogen intra-molekul dan antar-molekul. Struktur selulosa bersifat kristalin yang memiliki kepadatan

pengepakan lebih tinggi yang membantu meningkatkan kekuatan struktur biomassa. Sifat selulosa yang higroskopis meningkatkan jarak antar rantai selulosa sehingga terjadi pembengkakan biomassa. Dengan demikian, selama periode perlakuan panas, produk padat mengalami fenomena penyusutan yang menyebabkan variasi dimensi.

- b. Hemiselulosa, adalah polisakarida dinding tumbuhan, yang memperkuat dinding sel primer. Penyusun utama hemiselulosa terdiri dari gugus asetil dan metil tersubstitusi. Kelompok-kelompok ini bertanggung jawab untuk melepaskan gas volatil ringan seperti CO₂ dan CO, pada pretreatment termal temperatur rendah. Hemiselulosa, yang memiliki tingkat polimerisasi yang lebih rendah dibandingkan dengan selulosa, mengalami degradasi termal yang substansial, dan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil massa dalam proses torefaksi.
- c. Lignin, adalah polimer tiga dimensi yang terdiri dari ikatan C-O-C dan C-C yang dominan. Lignin terurai secara termal pada rentang temperatur yang luas, karena berbagai gugus fungsi oksigen dari strukturnya memiliki stabilitas termal yang berbeda, pemotongannya terjadi pada temperatur yang berbeda. Lignin stabil secara termal pada rentang temperatur yang luas dari 100 °C hingga 900°C. Dengan demikian, dalam proses torefaksi, lignin kurang termodifikasi dan biomassa dengan kandungan lignin lebih tinggi menghasilkan lebih banyak produk padat (Nhuchhen dkk., 2014).



Gambar 2.1 Struktur dinding sel tumbuhan (Nhuchhen dkk., 2014).

2.2 Kulit Kakao

Kulit kakao merupakan bagian terluar dari tanaman kakao yang mempunyai nama latin *Theobroma cacao L.* atau biasa kita sebut dengan coklat merupakan tanaman yang banyak ditemukan tumbuh di daerah tropis. Pada abad ke 15 bangsa Amerika membawa kakao ke Eropa dan mulai dikembangkan menjadi coklat batangan di Eropa. Hal ini dimungkinkan dengan bantuan temperatur Eropa yang dingin dan campuran lemak dan gula dalam coklat. Sejak saat itulah kakao mulai dikenal dan menyebar ke seluruh dunia terutama di negara yang mempunyai iklim tropis (Laondi, 2021). Secara umum kakao adalah tumbuhan menyerbuk silang dan memiliki sistem inkompatibilitas sendiri. Buah tumbuh dari bunga yang diserbuki. Ukuran buah jauh lebih besar dari bunganya, dan berbentuk bulat hingga memanjang. Buah terdiri dari 5 daun buah dan memiliki ruang serta di dalamnya terdapat biji. Warna buah berubah-

ubah. Sewaktu muda berwarna hijau hingga ungu. Apabila masak kulit luar buah biasanya berwarna kuning (Kamelia dan Fathurohman, 2017).

Tanaman kakao (*Theobroma cacao, L*) atau biasa disebut dengan cokelat merupakan tanaman yang tumbuh di daerah tropis. Di Indonesia tanaman kakao sendiri tersebar sebagian besar di beberapa pulau seluruh wilayah Indonesia, diantaranya di pulau Jawa, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Berdasarkan survei lapangan kulit buah kakao dibuang begitu saja, tanpa ada yang memanfaatkan. Ketersediaan kulit buah kakao cukup banyak karena sekitar 75% dari satu buah kakao utuh adalah berupa kulit buah, sedangkan biji kakao sebanyak 23% dan plasenta 2% (Pakaya dkk., 2019).

2.3 Karakteristik Bahan Bakar

Karakteristik bahan bakar yang menjadi acuan dalam suatu bahan bakar batubara adalah parameter dari komponen penyusunnya. Berikut ini adalah beberapa pengujian karakteristik yang dapat dilihat dari komponen penyusun bahan bakar, yaitu:

2.1.1 Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan suatu nilai kuantitas atau sejumlah panas baik yang diserap ataupun dilepaskan oleh suatu benda panas. Nilai kalor sangat berpengaruh terhadap laju pembakaran daripada bahan bakar. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui nilai kalor yang mampu dibangkitkan dari setiap sampel bahan bakar yang diuji menggunakan bom kalori meter.

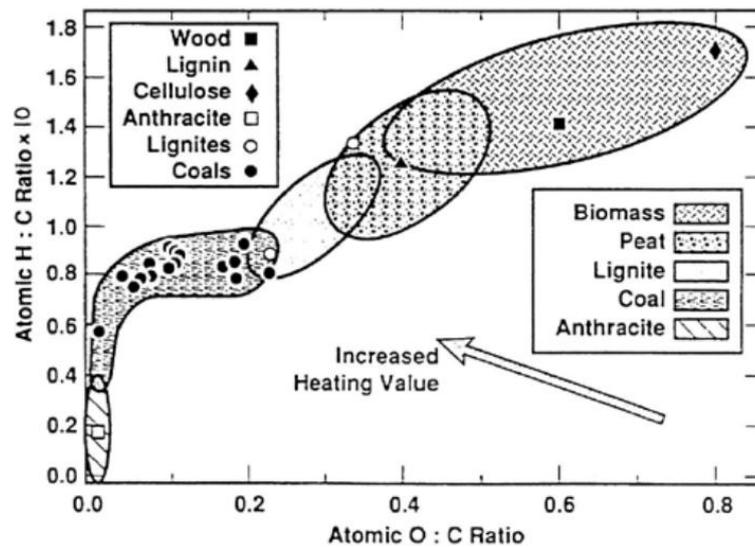
2.1.2 Analisis proksimat

Analisis proksimat merupakan suatu langkah awal dalam menentukan kualitas daripada batu bara yang meliputi penentuan kandungan:

- a. *Fixed carbon* merupakan kadar karbon tetap yang terdapat dalam suatu bahan bakar padat. Kandungan ini ada setelah *volatile matters*/ bahan-bahan yang mudah menguap dipisahkan dari bahan bakar padat tersebut.
- b. *Volatile matter* merupakan suatu zat aktif yang dapat menghasilkan energi panas/ kalor apabila bahan tersebut dibakar. Umumnya terdiri dari gas-gas yang mudah terbakar seperti gas Hidrogen, Karbon Monoksida dan Metana (CH₄). Volatile Matter sangat erat kaitannya dengan kualitas bahan, makin tinggi kandungan volatil makin rendah kualitas bahan.
- c. *Ash* (abu) merupakan kotoran bahan baku biomassa yang tidak akan terbakar. Kandungan didalamnya berkisar antara 5% hingga 40%. Kadar abu mempengaruhi efisiensi pembakaran yang terjadi.
- d. *Moisture content* merupakan suatu kandungan air yang terdapat pada bahan bakar padat. Semakin besar kandungan air yang terdapat pada bahan bakar padat, maka nilai kalornya semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Kadar air akan menurunkan kandungan panas per-kg berkisar antara 0,5 hingga 10 % (Adja dan Anam, 2021).

2.1.3 Analisis ultimat

Analisis ultimat merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui elemen organik penyusun bahan bakar padat, seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Analisis ultimat dapat digambarkan pada diagram Van Krevelen seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Diagram Van Krevelen menjelaskan hubungan antara karbon, oksigen, dan hidrogen dalam bentuk perbandingan. Karakteristik bahan bakar padat yang baik memiliki rasio O:C dan H:C yang menurun (Praevia dan Widayat, 2022).



Gambar 2.2 Diagram van krevelen (Praevia dan Widayat, 2022).

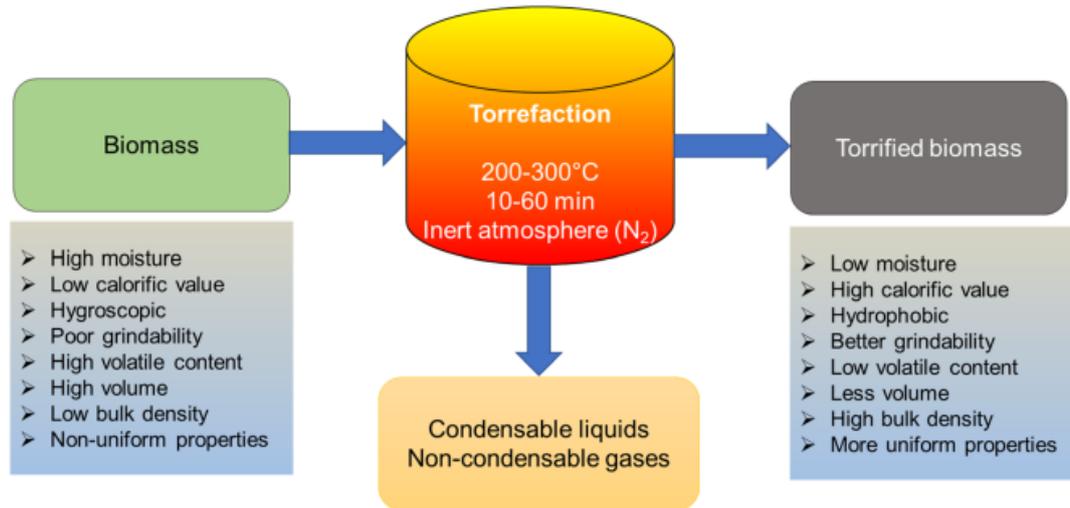
Kulit kakao merupakan biomassa yang memiliki potensi untuk menjadi bahan bakar terbarukan yang mendekati batubara. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Surono dkk. (2020), karakteristik bahan bakar yang dimiliki oleh kulit kakao mentah disajikan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Karakteristik bahan bakar kulit kakao mentah (Surono dkk., 2020).

Analisis	Nilai	
Analisis Proksimat (wt% adb)	Moisture	10.65
	Volatile	60.78
	Fixed carbon	21.74
	Ash	6.82
Analisis Ultimat (wt% adb)	C (Carbon)	41.94
	H (Hidrogen)	5.87
	O (Oksigen)	44.27
	N (Nitrogen)	0.93
	S (Sulfur)	0.16
Higher Heating Value (MJ/kg)	16.35	

2.4 Torefaksi

Torefaksi adalah proses pengolahan secara termokimia untuk bahan baku yang mengandung karbon seperti biomassa. Torefaksi membutuhkan pemanasan biomassa pada temperatur antara 200 dan 300 °C selama 1 jam atau lebih pada tekanan atmosfer dan di bawah lingkungan yang kelemahan oksigen. Transformasi sifat biomassa yang disebabkan torefaksi disajikan secara grafis pada Gambar 2.3. Torrefaksi akan mengurangi kandungan hidrogen dan oksigen dalam biomassa sambil meningkatkan kandungan karbonnya, yang menghasilkan eliminasi sebagian bahan volatil, sehingga meningkatkan densitas energinya. Kemudian torrefaksi mendegradasi sebagian besar hemiselulosa yang menghasilkan pembentukan berbagai gas permanen dan uap yang dapat terkondensasi termasuk air (Sarker dkk., 2021).



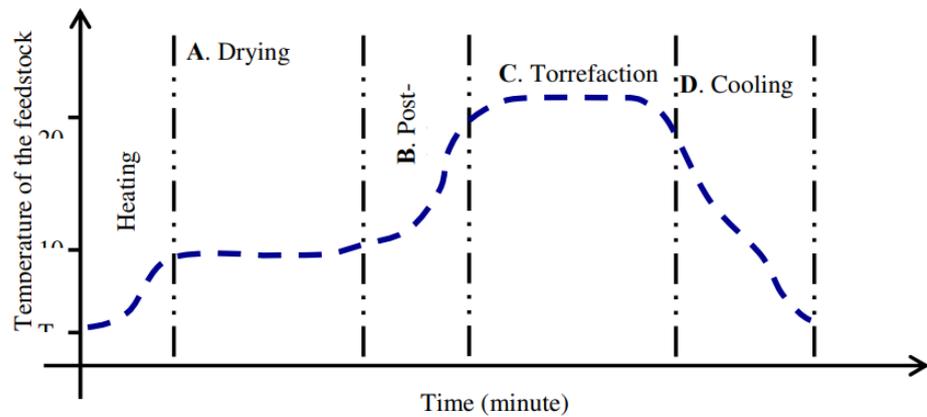
Gambar 2.3 Perbedaan biomassa mentah dan produk torefaksi biomassa
(Sarker dkk., 2021).

Dengan meningkatnya temperatur akhir torefaksi, mengakibatkan gas volatil yang dihasilkan akan bertambah dari hasil dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa. Hemiselulosa akan terdekomposisi terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan dekomposisi lignin dan selulosa. Dengan proses torefaksi maka kandungan karbon tetap akan meningkat dan kandungan zat-zat terbang akan menurun sehingga kualitas biomassa akan meningkat. Kemudian, keunggulan lain dari proses torefaksi adalah kandungan air dari produk makin menurun serta sifat makin sulit menyerap air dari udara. Secara umum, kualitas produk torefaksi biomassa adalah densitas energi dan hidrofobik meningkat. Proses torefaksi memiliki manfaat tambahan mengurangi atau menghilangkan bahan mudah menguap yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Dengan kandungan oksigen lebih rendah maka rasio oksigen terhadap karbon akan menurun sehingga biomassa memiliki karakteristik mendekati batubara (Irawan dkk., 2015).

Selain itu, teknologi konversi termokimia lainnya seperti pirolisis, gasifikasi, pembakaran, dan pembakaran bersama secara positif dipengaruhi oleh torefaksi. Torefaksi melemahkan kimia struktural yang melekat pada biomassa, sehingga membuatnya lebih mudah untuk terdegradasi secara termal melalui teknologi konversi termokimia lainnya. Sebagai pretreatment, torefaksi menurunkan konsumsi daya dan waktu secara keseluruhan serta pengeluaran proses yang diperlukan untuk pengeringan dan penggilingan biomassa (Sarker dkk., 2021).

Salah satu tujuan proses torefaksi adalah meningkatkan kandungan nilai kalor pada biomassa, hal ini dapat dilihat pada penelitian yang dilakukan oleh Surono dkk. (2020). Penelitian tersebut menggunakan biomassa kulit kakao yang telah dikeringkan terlebih dahulu, kemudian dilakukan proses torefaksi menggunakan reaktor jenis *batch* dengan variasi temperatur sebesar 200, 250, dan 300 °C, serta variasi waktu tinggal sebesar 0, 30, 60, dan 90 menit. Pada variasi waktu tinggal 30 menit, saat temperatur operasi mencapai 200 °C menghasilkan nilai kalor sebesar 4373 kkal/kg. Kemudian pada waktu tinggal yang sama dan temperatur operasi mencapai 250 °C menghasilkan nilai kalor sebesar 4676 kkal/kg. Sedangkan pada temperature operasi 300 °C menghasilkan nilai kalor sebesar 5178 kkal/kg. Kondisi ini membuktikan bahwa torefaksi dengan variasi temperature yang berbeda dapat meningkatkan nilai kalor biomassa agar sifatnya dapat mendekati karakteristik batubara.

2.4.1 Mekanisme Torefaksi

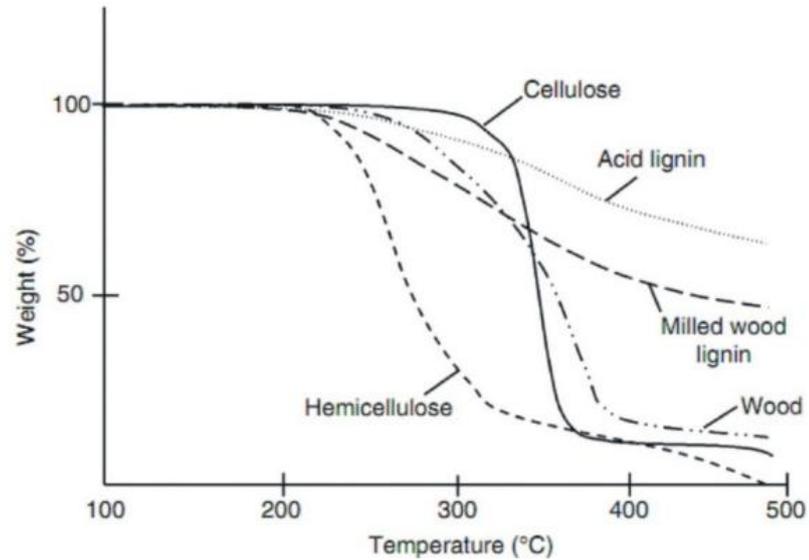


Gambar 2.4 Tahapan proses torefaksi (Nhuchhen dkk., 2014).

Biomassa mengalami beberapa pemanasan yang bertahap untuk menjadi produk torefaksi seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Pemanasan dalam proses torefaksi ini berhubungan dengan perubahan massa, temperatur dan konsumsi energi dari biomassa pada proses torefaksi. Menurut Apriyanto dkk. (2018), berikut ini adalah beberapa tahap pemanasan dalam proses torefaksi:

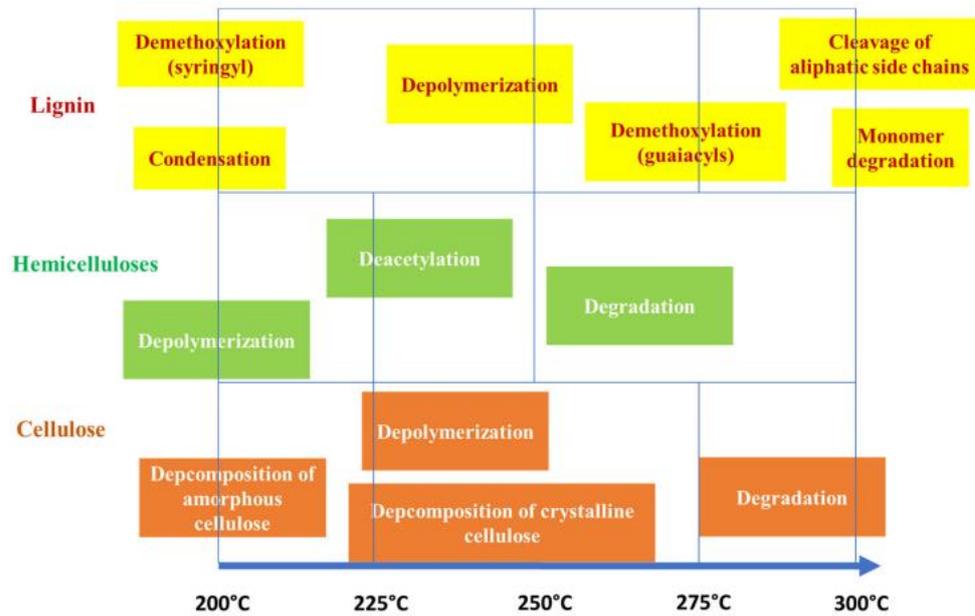
1. Tahap pertama adalah pemanasan awal (*heating*) yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air pada permukaan biomassa. Proses ini ditandai dari perubahan temperature ruang menuju temperature pengeringan yang berkisar 100 °C.
2. Tahap kedua adalah pengeringan (*drying*), air akan lepas dari ikatan dengan reaksi kimia (*inherent moisture*). Air tersebut diperoleh dari proses termokondensasi pada temperature 160 °C.
3. Tahap ketiga biomassa dipanaskan lebih lanjut (*postdrying*) sampai dengan temperature 200 °C sebelum tahap torefaksi. Selama proses

ini semua unsur kelembapan senyawa organik teh hilang dari biomassa.



Gambar 2.5 Tahap kehilangan berat biomassa saat torefaksi (Piersa dkk., 2022).

Penyebab utama kehilangan berat biomassa selama torefaksi berasal dari degradasi unsur hemiselulosanya. Komponen hemiselulosa paling banyak terdegradasi dalam kisaran temperatur 200 °C hingga 300 °C, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Komponen dinding biomassa, lignin, mulai melunak melebihi temperatur pelunakan kaca (sekitar 130 °C), yang membantu peletisasi produk torefaksi biomassa. Tidak seperti hemiselulosa, selulosa hanya mengalami sedikit devolatilisasi dan karbonisasi, yang tidak dimulai di bawah 250 °C. Namun ketika temperatur mencapai 300 °C, selulosa dan hemiselulosa mengalami degradasi secara ekstensif selama torefaksi, sehingga menghasilkan zat densitas energi yang lebih tinggi (Piersa dkk., 2022).



Gambar 2.6 Reaksi komponen biomassa saat torefaksi
(Sarker dkk., 2021).

Mekanisme reaksi degradasi komponen biomassa pada temperatur yang bervariasi ditunjukkan pada Gambar 2.6. Torrefaksi pada 150–200 °C menghasilkan dehidrasi untuk menghilangkan kelembapan dan volatil yang lebih ringan. Pada temperatur 200 °C, selulosa amorf mulai terdegradasi sedangkan selulosa kristal membutuhkan temperatur yang relatif lebih tinggi, yaitu > 250 °C. Hemicelulosa juga terdegradasi pada temperatur yang lebih rendah dari 150–200 °C melalui fragmentasi, deasetilasi, dan depolimerisasi. Selama reaksi fragmentasi, asam asetat dan format terbentuk. Degradasi termal lignin sangat sulit karena strukturnya yang kompleks. Pelunakan lignin terjadi pada temperatur yang lebih rendah (yaitu, 160–190 °C) dari torefaksi. Selain itu, pembelahan ikatan α - dan β -aryl-alkil eter, serta rantai samping alifatik,

masing-masing terjadi pada temperatur 150–300 °C dan 300 °C. Perengkahan termal lignin selama torefaksi biomassa pada temperatur torefaksi tipikal 200–300 °C relatif lebih rendah karena rekalsitransnya berbeda dengan selulosa dan hemiselulosa. Devolatilisasi parsial biomassa terjadi selama torefaksi sebagai perlakuan panas biomassa mendehidrasi biomassa dan menyebabkan dekarboksilasi fraksional dan dekarbonilasi serta meningkatkan nilai kalor bahan bakar padat.

2.4.2 Parameter Operasi Torefaksi

Hasil produk padat, cair, dan gas dari torefaksi dan perlakuan termokimia lainnya dari biomassa sebagian besar dipengaruhi oleh parameter proses seperti:

1. Temperatur, pengaruh temperatur torefaksi sangat penting dalam menentukan hasil dan sifat yang lebih baik dari produk torefaksi biomassa diikuti dengan waktu reaksi dan laju pemanasan. torefaksi umumnya dilakukan pada suhu rendah dengan waktu tinggal yang singkat menggunakan laju pemanasan rendah untuk hasil akhir padat yang lebih tinggi.
2. *Residence time* atau waktu tinggal torefaksi yang singkat (15-60 menit) cukup untuk proses torefaksi lengkap pada biomassa, dan memperpanjang waktu tinggal tidak menunjukkan efek yang signifikan pada transformasi biomassa.

3. Laju pemanasan yang lebih rendah menguntungkan untuk hasil yang lebih tinggi dari produk torefaksi biomassa padat.
4. Ukuran partikel biomassa memiliki pengaruh yang kurang signifikan terhadap proses torefaksi dibandingkan dengan suhu dan waktu tinggal. Namun, ukuran partikel harus diperhitungkan untuk memungkinkan pemanasan seragam biomassa dalam hal perpindahan massa selama torefaksi untuk hasil padat dan energi yang lebih baik.
5. Kadar air biomassa umumnya berdampak pada proses konversi energi selama torefaksi, sehingga kadar air biomassa mentah harus dijaga minimal untuk torefaksi kering (Ong dkk., 2021).

2.4.3 Kualitas Produk Torefaksi

Kualitas produk torefaksi tidak hanya dengan berkurang massa produk torefaksi, karena pengurangan massa berlebih dapat juga menurunkan kepadatan energi dari produk torefaksi. Menurut Basu (2018), kualitas produk torefaksi diidentifikasi dengan beberapa parameter yaitu:

a. *Mass Yield* (MY)

Mass yield (MY) merupakan fraksi massa asli biomassa yang akan tersisa dari hasil torefaksi. *Mass yield* akibat torefaksi didefinisikan dengan fraksi dari komponen organik asli biomassa yang diubah menjadi arang, dan harus ditentukan dengan kondisi “*dry ash free*” (daf). Sedangkan untuk produk torefaksi dari biomassa yang kandungan anorganiknya yang tinggi sehingga jumlah total padatan

mencangkup abu, maka pada kondisi “*dry base*” (db). Selain dua kondisi tersebut, terdapat kondisi ketiga yang menentukan kondisi material secara menyeluruh “*as-received*” (ar).

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

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

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

b. *Energy Yield (EY)*

Energy yield 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:

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

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

$$EY = MY \times \frac{HHV_f}{HHV_o}$$

c. *Energy Density*

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

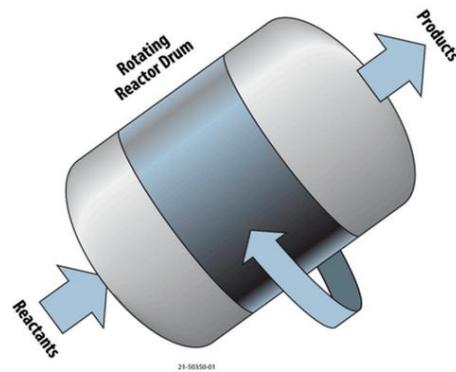
satuan massa atau volume produk dibakar. Torefaksi meningkatkan kandungan energi dalam biomassa, namun menurunkan massa dan volume biomassa. Semakin meningkat temperatur operasi torefaksi dapat menurunkan *mass yield* dan *energy yield*, namun menghasilkan *energy density* yang meningkat dalam produk torefaksi biomassa. *Energy density* dalam basis massa dapat dinyatakan dengan satuan kJ/kg, Btu/lb, atau kkal/kg. Sedangkan dalam basis volume, *energy density* dinyatakan dengan satuan kJ/m³, Btu/ m³, atau kkal/ m³. *Energy density* dalam basis volume diaplikasikan kasus tertentu, seperti pengiriman bahan bakar yang perlu mempertimbangkan berat maksimal yang diberikan kepada roda kendaraan. *Energy density* dalam torefaksi dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\text{Energy Density} = \frac{EY}{MY}$$

2.4.4 Jenis-Jenis Reaktor Torefaksi

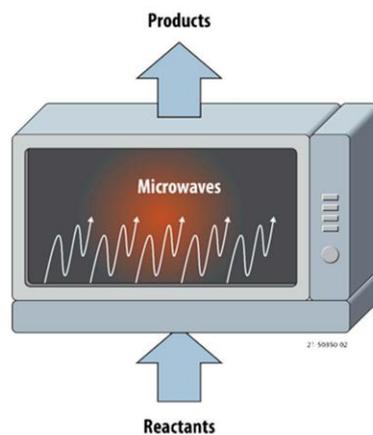
Pengembangan teknologi torefaksi saat ini semakin berkembang sehingga menyebabkan proses torefaksi dapat dilakukan melalui berbagai metode dan menggunakan berbagai solusi transfer panas serta teknologi konversi biomassa yang memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Menurut Tumuluru dkk. (2021), berikut ini adalah beberapa jenis reaktor torefaksi yang biasa digunakan:

1. *Fixed bed reactor*, reaktor jenis ini merupakan jenis reaktor paling sederhana dibandingkan reaktor torefaksi biomassa jenis lainnya. Reaktor ini bekerja dengan proses batch (setumpuk dalam satu kali proses), biomassa disuspensikan dalam keranjang jaring logam di lapisan pasir terfluidisasi industri dengan kisaran suhu 50–600 °C. Beberapa kelemahan dari reaktor *fixed bed* yaitu seperti pengambilan sampel produk yang sulit, perpindahan panas dan kontrol suhu yang buruk, serta peningkatan skala yang tidak mudah.
2. *Fluidized bed reactor*, reaktor jenis ini biomassa difluidisasi menggunakan gas panas lembam yang dihembuskan dari dasar reaktor. Biomassa mentah dikurangi ukurannya menjadi partikel yang lebih kecil untuk difluidisasi dalam reaktor untuk memastikan distribusi suhu yang seragam di seluruh *bed*.
3. *Rotary drum reactor*, reaktor ini menggunakan drum untuk membakar biomassa di bawah gas inert atmosfer seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Panas diberikan ke reaktor dan biomassa secara tidak langsung dengan melewati gas melalui cangkang reaktor. Kelemahan reaktor tipe ini adalah biaya yang relatif tinggi dan temperatur proses yang sulit dikendalikan.



Gambar 2.7 *Rotary drum reactor* (Tumuluru dkk., 2021).

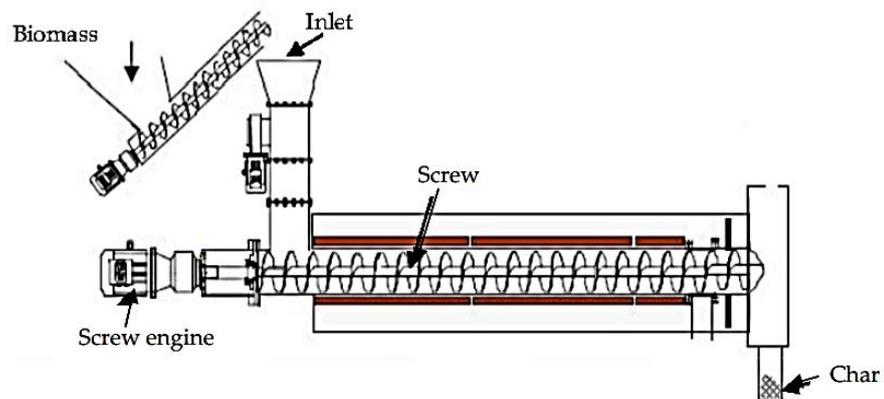
4. *Microwave reactor*, reaktor jenis ini menggunakan radiasi gelombang mikro adalah sumber panasnya seperti yang terlihat pada Gambar 2.8. Hal ini menyebabkan pemanasan biomassa menjadi lebih cepat dan secara konsisten lebih seragam daripada desain yang bergantung pada perpindahan panas dari sumber panas eksternal.



Gambar 2.8 *Microwave reactor* (Tumuluru dkk., 2021).

2.4.5 Reaktor Torefaksi Tipe Tubular

Reaktor torefaksi tipe tubular terjadi pemanasan secara tidak langsung yang dipanaskan oleh boiler terpisah dengan minyak. Gambar 2.9 memperlihatkan bagian dalam reaktor ulir yang mendorong biomassa ke depan melalui ulir reaktor yang bengkok. Jenis reaktor ini memastikan kontinuitas proses dan desain yang kompak. Keterbatasan reaktor sekrup termasuk kesulitan dalam meningkatkan dan efisiensi energi yang rendah (60–80%). Reaktor jenis ini juga membutuhkan biomassa dengan kadar air rendah karena ukuran reaktor menentukan beban panas yang dibutuhkan, dan untuk alasan desain, perpindahan panasnya terbatas. Dalam kasus suhu tinggi, kadar air yang rendah (sekitar 5-7%) adalah wajib karena reaktor tidak akan mampu mencapai suhu proses yang diperlukan (Piersa dkk., 2022)



Gambar 2.9 Layout reaktor tipe tubular atau *screw*

(Piersa dkk., 2022).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular *Oil Jacket*



Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket*.

Reaktor torefaksi yang terlihat pada Gambar 3.1 merupakan alat utama dalam penelitian ini yang berfungsi untuk melakukan proses torefaksi terhadap sampel. Reaktor ini bekerja secara kontinu dengan menggunakan sistem pemanas eksternal berupa *oil jacket* dan bergerak dengan sistem

screw conveyor. Tabel 3.1 berikut menunjukkan spesifikasi mesin reaktor torefaksi yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3. 1 Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular (Apriyanto dkk., 2018).

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	
Electromotor	: 2 unit @ 2 dan 0,5 Hp
Ratio Gear Reducer	: 2 unit @ 1 : 60
Medium Pemanas	
Jenis	: <i>Heat Transfer Oil CaflotMAF</i>
Merk	: <i>Petro Canada</i>
Temperatur Maksimum	: 375 °C
Tekanan Kerja	: 1 atm
Sistem Pembakaran	
Ruang Bakar	: <i>Horizontal Burner</i>
Bahan Bakar	: <i>Liquified Petroleum Gas (LPG)</i>
Sistem Kontrol Temperatur	
Sensor Temperatur	: <i>Thermocouple Tipe K</i>
Sistem Cooling Char	
Sistem Sirkulasi Air	: Pompa Air

2. 12 Channel Temperature Recorder Datalogger

Temperature recorder berfungsi untuk mencatat temperatur pembakaran yang sedang terjadi, baik di dalam reaktor, *oil jacket*, maupun *cooling char* dan dinding terluar reaktor seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 12 Channel temperatur recorder datalogger

3. Bahan atau Sampel Kulit Kakao

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kulit buah kakao seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. Kulit kakao yang digunakan berasal dari Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Kulit kakao tersebut dikeringkan terlebih dahulu dibawah matahari kemudian dicacah agar dimensinya menjadi kecil sehingga memudahkan proses torefaksi.



Gambar 3.3 Sampel biomassa kulit kakao (*chip*)

4. Alat Pendukung

Alat pendukung lainnya yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seperti tabung LPG 12 kg, regulator LPG, pompa air, pemantik api, terminal kabel listrik, termokopel tipe K, timbangan digital, wadah *stainless steel*, plastik cetik, label, pena, kamera, dan laptop.

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini melakukan torefaksi menggunakan biomassa kulit kakao sebagai sampel utamanya yang memanfaatkan jenis reaktor kontinu tipe tubular. Besarnya massa kulit kakao yang akan ditorefaksi adalah sebesar 300 gram pada setiap variasi temperatur. Parameter yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah variasi temperatur dengan besar 250, 275 dan 300 °C serta waktu tinggal proses torefaksi sebesar 30 menit. Kulit kakao yang telah ditorefaksi kemudian dilakukan pengujian laboratorium serta analisis untuk mengetahui karakteristik bahan bakar yang dapat dihasilkan dari proses torefaksi pada sampel kulit kakao seperti analisis ultimat dan proksimat serta besar nilai kalor.

3.3 Prosedur Torefaksi Biomassa

Berikut ini merupakan tahapan proses torefaksi dan pengujian pada sampel biomassa kulit kakao yang akan dilakukan, yaitu:

1. Mempersiapkan bahan atau sampel biomassa kulit kakao kering kemudian dicacah menjadi potongan kecil bekisar 1-2 cm.

2. Mengeringkan kembali sampel biomassa kulit kakao dengan bantuan cahaya matahari.
3. Melakukan pensortiran sampel biomassa kulit kakao menggunakan jaring kemudian menyisihkan sampel sebesar 900 gram menggunakan timbangan digital.
4. Mempersiapkan alat yang diawali dengan menghubungkan kabel motor penggerak dan pompa air dengan terminal listrik.
5. Menghubungkan regulator gas dengan tabung LPG 12 kg dan letakan pada wadah berisi air sirkulasi *cooling char*.
6. Menghidupkan motor penggerak *screw conveyor*, kemudian melakukan *running* pada mesin reaktor untuk mengeluarkan sisa-sisa hasil torefaksi biomassa sebelumnya selama 30 menit.
7. Menyalakan *temperature recorder* dan melakukan kalibrasi dengan cara menghubungkan *temperature recorder* dengan termokopel, kemudian sentuhkan ujung termokopel dengan air dingin dan air hangat lalu menjaga temperatur yang tampilkan pada layar *temperature recorder* hingga stabil.
8. Menghubungkan *temperature recorder* dengan termokopel yang ada pada reaktor untuk membaca temperatur pada setiap bagian reaktor setelah melakukan kalibrasi.
9. Membuka katup gas untuk mengalirkan gas ke saluran *burner* yang ada di sekitar dinding *oil jacket*.
10. Menyalakan api pada saluran *burner* menggunakan pemantik api.

11. Mengatur besar bukaan katup saluran gas agar temperatur pada T1, T2, dan T3 mencapai 250 °C, kemudian tunggu selama 15 menit sampai temperatur T1, T2, dan T3 stabil.
12. Memasukkan kulit kakao secara bertahap dengan massa sebesar 100 gram hingga mencapai 300 gram dengan interval waktu berkisar 1-2 menit guna meminimalisir tersangkutnya sampel kulit kakao di dalam reaktor ketika sudah mencapai temperatur reaktor yang diinginkan.
13. Mengeluarkan produk torefaksi kulit kakao yang pertama kali dimasukkan ke dalam reaktor setelah melewati waktu tinggal 30 menit dengan cara mendorong pendorong pada *cooling char*, kemudian membuka katup pembuka pada *cooling char*.
14. Mengeluarkan produk torefaksi kulit kakao berikutnya setiap 2 menit setelah produk torefaksi pertama keluar hingga produk torefaksi terakhir keluar.
15. Menunggu 15 menit setelah produk torefaksi kulit kakao terakhir keluar untuk memastikan tidak ada sisa sampel yang tersisa di dalam reaktor.
16. Mengumpulkan seluruh produk torefaksi kulit kakao yang telah melalui proses torefaksi kemudian mengukur kembali massa kulit kakao yang sudah mengalami torefaksi menggunakan timbangan digital untuk mengetahui perbandingan massa kulit kakao sebelum mengalami torefaksi dan setelah mengalami torefaksi.
17. Mengulangi kembali proses 11-16 dengan massa yang sama namun pada variasi temperatur 275 °C dan 300 °C

18. Menyisihkan produk torefaksi kulit kakao dari setiap variasi temperatur serta sampel kulit kakao mentah sebesar 10 gram secara acak untuk dilakukan pengujian nilai kalor, analisis ultimat, dan proksimat.

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan penelitian ini yaitu 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: tahapan selanjutnya yaitu persiapan perlengkapan alat-alat utama reaktor serta alat pendukung reaktor torefaksi, seperti melakukan pembersihan reaktor, mengeluarkan sisa produk torefaksi biomassa sebelumnya, penggantian komponen yang rusak seperti termokopel dan selang gas, serta membeli peralatan pendukung seperti timbangan, pompa air, wadah produk dan lain-lain.
- Proses Torefaksi: setelah alat siap untuk dioperasikan, selanjutnya dilakukan pengujian dengan memproses seluruh sampel yang ada dengan variasi temperatur torefaksi yakni 250, 275, dan 300 °C.
- Pengujian Laboratorium: setelah seluruh sampel dilakukan torefaksi dan didapatkan produk hasil torefaksi, selanjutnya dilakukan pengujian laboratorium dengan mengirimkan sampel mentah dan sampel produk hasil torefaksi setiap temperatur untuk dilakukan pengujian proksimat, pengujian ultimat, dan nilai kalor.

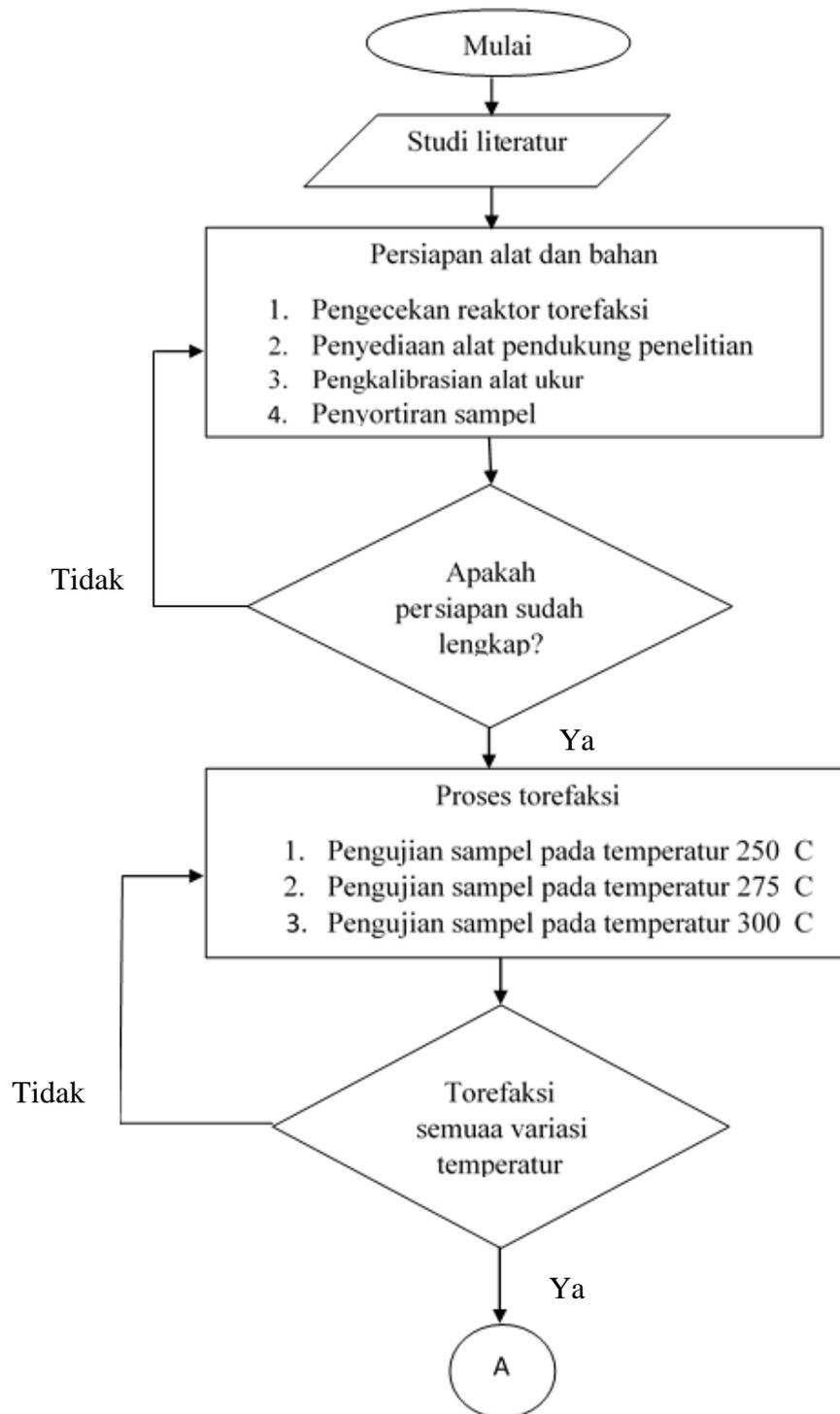
- Analisis Hasil Seluruh Pengujian : setelah semua data telah terkumpul, tahapan selanjutnya adalah menganalisis hasil seluruh data pengujian dari hasil laboratorium. Analisis data meliputi analisis proksimat, analisis ultimat dan nilai kalor.
- Kesimpulan : Langkah terakhir dari penelitian ini adalah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

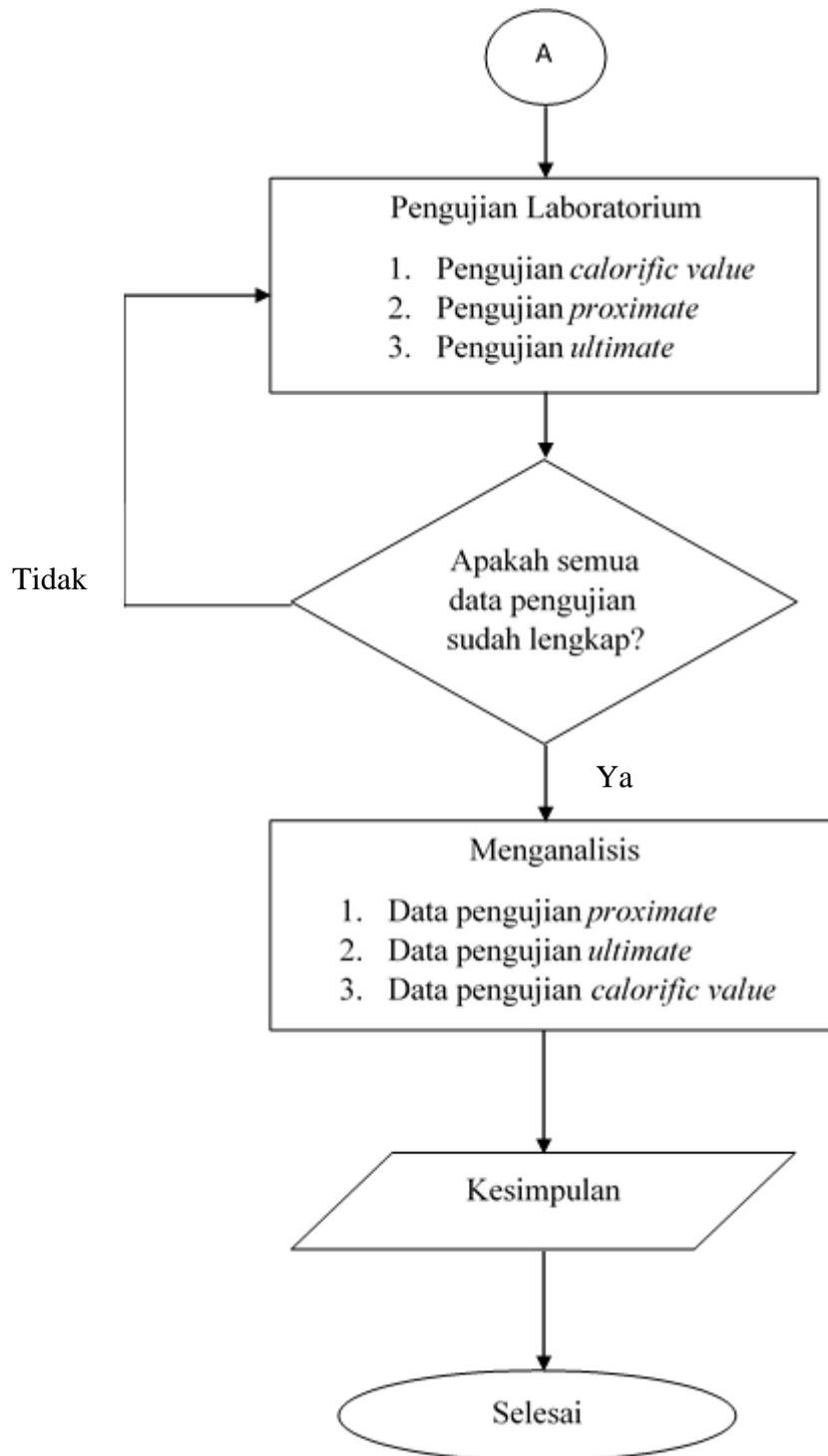
3.5 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2023 sampai dengan bulan Juni 2023. Lokasi penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Teknik Mesin Universitas Lampung dan Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Lampung. Pengujian hasil laboratorium dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas Lampung serta Laboratorium Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Adapun alur penelitian yang dilakukan digambarkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.4 sebagai berikut:





Gambar 3.4 Diagram alir penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Temperatur operasi mempengaruhi peningkatan dan penurunan karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi kulit kakao. Temperatur operasi 275 °C menghasilkan nilai kalor terbesar, yaitu 6662 kkal/kg dengan peningkatan 57% dari kulit kakao mentah. Kemudian temperatur operasi 300 °C menghasilkan nilai kalor sebesar 6277 kkal/kg dengan peningkatan 48%. Temperatur 250 °C menghasilkan nilai kalor terkecil, yaitu 5083 kkal/kg dengan peningkatan sebesar 20%. Analisis proksimat memperlihatkan peningkatan kandungan karbon tetap sebesar 30% dan penurunan kandungan volatil sebesar 21% dari kulit kakao mentah. Kandungan atom karbon meningkat sebesar 25% dan kandungan oksigen menurun sebesar 25% melalui analisis ultimat.
2. Temperatur operasi mempengaruhi persentase *mass yield*, *energy yield*, dan fraksi nilai *energy density*. Temperatur operasi 275 °C menyisakan persentase *mass yield* sebesar 48% dan *energy yield* sebesar 75%, namun menghasilkan fraksi nilai *energy density* terbesar yaitu 1,57. Kemudian temperatur operasi 300 °C menghasilkan fraksi nilai *energy density* yaitu

1,48. Temperatur operasi 250 °C menghasilkan fraksi nilai *energy density* terendah yaitu 1,2. Hasil ini mengartikan bahwa semakin besar jumlah energi yang dapat dihasilkan saat bahan bakar tersebut digunakan seiring dengan penurunan massa yang terjadi pada temperatur operasi 275 °C.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait variasi *residence time* dengan variasi temperatur yang sama untuk mengetahui produk torefaksi yang akan dihasilkan.
2. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait persiapan ukuran sampel kulit kakao yang lebih seragam untuk mendapatkan hasil bahan bakar torefaksi yang maksimal.
3. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait pengujian kandungan lignoselulosa pada produk torefaksi untuk mengetahui fenomena perubahan lignoselulosa yang terjadi selama proses torefaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adja, H. B., & Anam, A. (2021). Study Komparasi Sekam Padi Sebagai Bahan Bakar Alternatif Berbasis Proximate And Ultimate Analysis. *Jurnal Mesin Material Manufaktur dan Energi*, 2(1), 8-17.
- Amrul, Apriyanto, A., Sanjaya, I., & Amrizal. (2018). Experimental Study on Waste Biomass Torrefaction Using a Continuous Tubular Reactor. *PROSIDING Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 2018 - SNTTM XVII*, 304–309.
- Apriyanto, A., No, J. I. B., & No, J. S. B. (2018). Rancang Bangun Dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Jurnal Tesis Program Pasca Sarjana Teknik Mesin Universitas Negeri Lampung*. Hal, 22-23. Bandar Lampung.
- Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Lampung. (2022). *Produksi Tanaman (Ton) 2022*. <https://lampung.bps.go.id/indicator/54/258/1/produksitanaman.html>
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction Practical Design and Theory*. In R. zanol (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third)*. Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0/00014-5>
- Chuchita, C., Sari, M. R., & Karelius, K. (2022). Proses Torefaksi Dengan Metode Batch Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Bohr: Jurnal Cendekia Kimia*, 1(01), 1-12.

- Faizah, S. (2022). Pengukuran Emisi Terhadap Dampak Lingkungan Pada Pltu Menggunakan Life Cycle Assessment (Studi Kasus: Pltu Teluk Sirih). (Skripsi). Universitas Andalas, Sumatera Barat.
- Hidayat, W., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., & Haryanto, A. (2020). Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(2), 169-181.
- Irawan, A., Riadz, T., & Nurmalisa, N. (2015). Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190-194.
- Kamelia, M., & Fathurohman, F. (2017). Pemanfaatan Kulit Buah Kakao Fermentasi Sebagai Alternatif Bahan Pakan Nabati Serta Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Ternak Entok (*Cairina Muschata*). *Biosfer: Jurnal Tadris Biologi*, 8(1), 66-77.
- Kusuma, I. G. N. S., Putra, I. N. K., & Darmayanti, L. P. T. (2019). Pengaruh Suhu Pengeringan Terhadap Aktivitas Antioksidan Teh Herbal Kulit Kakao (*Theobroma Cacao L.*). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 8(1), 85-93.
- Laondi, M. A. (2021). Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Arang Terhadap Karakteristik Briket Arang Kulit Kakao (Skripsi). Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. (2014). A Comprehensive Review On Biomass Torrefaction. *Int. J. Renew. Energy Biofuels*, 2014, 1-56.
- Ong, H. C., Yu, K. L., Chen, W. H., Pillejera, M. K., Bi, X., Tran, K. Q., ... & Pétrissans, M. (2021). Variation of lignocellulosic biomass structure from

- torrefaction: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111698.
- Pakaya, S. A., & Dako, S. (2019). Performa Ayam Kampung Super Yang Di Beri Level Penambahan Tepung Kulit Kakao (*Theobroma Cacao*, L.) Fermentasi Dalam Ransum. *Jambura Journal of Animal Science*, 1(2), 40-45.
- Piersa, P., Unyay, H., Szufa, S., Lewandowska, W., Modrzewski, R., Ślęzak, R., & Ledakowicz, S. (2022). An Extensive Review And Comparison Of Modern Biomass Torefaksi Reactors Vs. Biomass Pyrolysis — Part 1. *Energies*, 15(6), 2227.
- Praevia, M. F., & Widayat, W. (2022). Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 28-37.
- Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). A Review Of Torrefaction Technology For Upgrading Lignocellulosic Biomass To Solid Biofuels. *BioEnergy Research*, 14, 645-669.
- Surono, U. B., & Hutomo, S. G. (2021). Perbandingan Proksimat Analisis dan Homogenitas Nilai Kalor Biomassa Sebelum dan Sesudah Proses Torefaksi. *In Prosiding Seminar Nasional*.
- Surono, U. B., Saptoadi, H., & Rohmat, T. A. (2020). Improving Thermochemical And Physical Properties Of Cocoa Pod Shell By Torrefaction And Its Potential Utilization. *International Energy Journal*, 20(2).
- Tanbar, F., Purba, S., Samsudin, A.S., Supriyanto, E., & Aditya, I.A. (2021). Analisa Karakteristik Pengujian Co-Firing Biomassa Sawdust Pada PLTU Type Pulverized Coal Boiler Sebagai Upaya Bauran Renewable Energy.

Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy, 5(2), 50-56.

Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, And Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9, 728140.

Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudin, U., & Hidayat, W. (2020). Perubahan Sifat Fisis Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit Hasil Torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(2), 104-111. Bandar Lampung.