

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL
TERHADAP KUALITAS PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT DURIAN
SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF**

(Skripsi)

**Oleh :
Rizki Ramadhan
(2115021089)**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTASTEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL
TERHADAP KUALITAS PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT DURIAN
SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF**

**Oleh :
Rizki Ramadhan
(2115021089)**

**Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

**Pada
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTASTEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP KUALITAS PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT DURIAN SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF

Oleh:

Rizki Ramadhan

Kulit durian merupakan limbah biomassa lignoselulosa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif, namun pemanfaatannya secara langsung masih terbatas karena memiliki kadar air tinggi dan densitas energi yang rendah. Salah satu metode untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat adalah proses torefaksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur dan waktu tinggal terhadap kualitas produk hasil torefaksi kulit durian. Proses torefaksi dilakukan menggunakan reaktor kontinu tipe tubular dengan sistem *oil jacket* pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit. Parameter yang dianalisis meliputi nilai kalor, analisis proksimat, *mass yield*, *energy yield*, serta hidrofobisitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tinggal meningkatkan nilai kalor dan kandungan karbon tetap, namun menurunkan *mass yield* akibat proses devolatilisasi selama pemanasan. Nilai *energy yield* dipengaruhi oleh keseimbangan antara kehilangan massa dan peningkatan densitas energi. Selain itu, proses torefaksi juga meningkatkan sifat hidrofobisitas biomassa sehingga produk lebih tahan terhadap penyerapan air. Secara keseluruhan, proses torefaksi mampu meningkatkan kualitas kulit durian sebagai bahan bakar padat alternatif dengan densitas energi yang lebih tinggi dan stabilitas penyimpanan yang lebih baik.

Kata Kunci: Torefaksi, kulit durian, biomassa

ABSTRACT

EFFECT OF TEMPERATURE AND RESIDENCE TIME VARIATIONS ON THE QUALITY OF TORREFIED DURIAN PEEL PRODUCTS AS AN ALTERNATIVE FUEL

By:

Rizki Ramadhan

Durian peel is a lignocellulosic biomass waste with potential to be utilized as an alternative solid fuel; however, its direct utilization is limited due to high moisture content and low energy density. Torrefaction is one of the thermochemical processes used to improve biomass fuel quality. This study aims to analyze the effect of temperature and residence time variations on the quality of torrefied durian peel products. The torrefaction process was carried out using a continuous tubular reactor with an oil jacket heating system at temperatures of 250°C, 275°C, and 300°C with residence times of 10, 20, and 30 minutes. The evaluated parameters included calorific value, proximate analysis, mass yield, energy yield, and hydrophobicity. The results show that increasing temperature and residence time enhances calorific value and fixed carbon content but reduces mass yield due to devolatilization during heating. The energy yield is influenced by the balance between mass loss and energy densification. In addition, torrefaction improves biomass hydrophobicity, making the product more resistant to moisture absorption. Overall, torrefaction effectively upgrades durian peel into a higher-quality alternative solid fuel with improved energy density and storage stability

Keywords: *Torrefaction, durian husk, biomass*

Judul Skripsi

: **PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN
WAKTU TINGGAL TERHADAP KUALITAS
PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT
DURIAN SEBAGAI BAHAN BAKAR
ALTERNATIF**

Nama Mahasiswa

: **Rizki Ramadhan**

No. Pokok Mahasiswa

: **2115021089**

Jurusan

: **Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**



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

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

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 27 Februari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul **“PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP KUALITAS PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT DURIAN SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF”** merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 13 tahun 2019.

Bandar Lampung, 12 Maret 2026

Yang Menyatakan



Rizki Ramadhan
NPM. 2115021089

MOTTO

“Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.
Sesungguhnya beserta kesulitan itu ada kemudahan”
(Q.S Al-Insyirah, 94: 5-6)

“Dunia boleh saja melawanku, Ku punya Doa Ibu”
(Tapi-Perunggu)

“Jika dunia meragukanku, ada Bapak dan Ibu yang selalu meyakinkanku”
(Penulis)

“Semoga akhir dari semua perjalanan adalah kebahagiaan”
(Penulis)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin, dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, akhirnya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Skripsi ini bukan sekadar kumpulan tulisan dan hasil penelitian, melainkan rangkaian cerita tentang perjuangan, keraguan, harapan, dan doa yang terus mengiringi setiap langkah. Semua proses itu menjadikan karya ini lebih dari sekadar syarat kelulusan, tetapi juga bukti bahwa saya mampu bertahan hingga akhir. Perjalanan ini tidak selalu mudah, tidak selalu cepat, dan tidak selalu berjalan sesuai rencana. Saya belajar bahwa kelulusan bukan tentang siapa yang paling dahulu mencapai garis akhir, melainkan tentang siapa yang mampu bertahan, berproses, dan menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terlambat lulus bukanlah sebuah kegagalan. Setiap orang memiliki cerita dan perjuangannya masing-masing. Pada akhirnya, skripsi terbaik adalah skripsi yang selesai dengan penuh tanggung jawab. Dengan rasa bangga, tugas akhir ini saya persembahkan dengan sepenuh hati kepada:

Orang Tua Saya

Bapak Sriyono dan Ibu Endang Sri W

Terima kasih atas dukungan dan doa yang tidak pernah terputus, atas kerja keras yang mungkin tak selalu saya lihat, dan atas kasih sayang yang selalu menjadi rumah untuk saya pulang. Gelar Sarjana Teknik Mesin ini adalah buah dari dukungan dan kepercayaan yang selalu Bapak dan Ibu berikan. Semoga pencapaian ini menjadi langkah awal untuk membahagiakan keluarga dan membalas setiap doa yang telah dipanjatkan.

Kakak-kakak Saya

Terima kasih atas dukungan, motivasi, serta kebersamaan yang selalu menjadi penyemangat dalam setiap proses yang saya jalani hingga menyelesaikan pendidikan ini.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam di junjungkan kepada Baginda Rasulullah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaatnya kepada umatnya agar berada pada di jalan yang lurus. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan lebih lanjut. Maka, izinkanlah penulis menyampaikan penghormatan setinggi-tingginya atas jasa orang tua, seluruh dosen Teknik Mesin Universitas Lampung, serta kerabat yang telah rela mengorbankan waktu, tenaga, pikiran bahkan sampai hal-hal materil untuk membantu proses penyelesaian skripsi ini. Untuk itu penulis menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua penulis yang tercinta, Bapak Sriyono dan Ibu Endang Sri W yang selalu mendukung, mendidik, mendoakan dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama perkuliahan dan menyelesaikan skripsi.
6. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di

perkuliahan.

8. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta memberikan masukan dalam penyusunan skripsi ini.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
10. Kakak-kakak saya, Mas Galih dan Mas Dwi terima kasih banyak sudah hadir menjadi keluarga yang baik dan pengertian.
11. Teman-teman lab Termo yang terdiri dari Fathan, Komang, Rega, Ferta, Fauzan, dan Fardan yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
12. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2021 terima kasih atas kehadiran kalian yang menjadi suatu kenangan dan kesenangan dalam hidup penulis selama di kampus tercinta ini.
13. Teman-teman KWRT X SKL terima kasih atas kebersamaan, dukungan, dan semangat yang selalu diberikan. Setiap momen yang kita lalui menjadi bagian dari cerita perjuangan ini. Semoga persahabatan ini tetap terjaga dan kita semua diberikan kelancaran dalam meraih cita-cita.
14. Teman-teman CDWK, Biji X Asta dan Penduduk Doesoen terima kasih atas waktu, tawa, dan obrolan sederhana yang sering kali menjadi penenang di tengah tekanan skripsi. Semoga kebersamaan ini tidak hanya menjadi kenangan, tetapi juga tetap berlanjut dalam kesuksesan kita masing-masing.
15. Kepada seluruh pihak yang telah membantu dan tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis. Terima kasih atas dukungan dan bantuan kepada penulis hingga skripsi ini terselesaikan.
16. Kepada seseorang yang Istimewa terima kasih atas kehadiranmu, meski mungkin tidak selalu terlihat, tetapi selalu memberi semangat dan motivasi tersendiri bagi penulis. Dukunganmu menjadi salah satu energi untuk terus melangkah hingga menyelesaikan skripsi ini. Semoga kita dipertemukan kembali di versi terbaik dari diri kita masing-masing.

17. *Last but not least*, ucapan terima kasih saya persembahkan untuk diri saya Sendiri. Terima kasih sudah bertahan sampai titik ini. Tidak semua proses mudah, tidak semua beban bisa diceritakan, tetapi kamu memilih untuk tetap berdiri dan menyelesaikan apa yang sudah dimulai. Kamu tahu lelahnya, kamu tahu ragunya, dan kamu juga yang menanggungnya. Namun kamu tidak menyerah. Gelar S.T ini bukan sekadar pencapaian akademik, tetapi bukti bahwa kamu mampu bertanggung jawab atas pilihan dan perjuanganmu sendiri. Perjalanan belum selesai. Tetap rendah hati, tetap bekerja keras, dan ingat kamu pernah melewati fase ini dengan kepala tegak.

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

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 12 Maret 2026

Rizki Ramadhan
NPM. 2115021089

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gunug Batin Baru, Kabupaten Lampung Tengah pada tanggal 11 November 2002, penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Sriyono dan Ibu Endang Sri W. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 1 GUNUNG MADU (2009-2015), lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 4 BANDAR LAMPUNG (2015-2018), dan SMA NEGERI 12 BANDAR LAMPUNG (2018-2021), hingga pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Penulis melaksanakan program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Gunung Mekar, Kecamatan Jabung, Kabupaten Lampung Timur pada Juni-Juli 2024. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. PLN Nusantara Power UP Sebalang, Desa Sebalang, Kecamatan Katibung, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung pada Januari-Februari 2025, dengan topik **“ANALISIS KERUSAKAN PADA *PIPE LINE* MESIN *COAL FEEDER* DI PT PLN NUSANTARA POWER UP SEBALANG”**.

Pada tahun 2025 juga penulis tergabung dalam tim penelitian torefaksi dengan judul penelitian **“PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP KUALITAS PRODUK HASIL TOREFAKSI KULIT DURIAN SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF”**. Di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. serta Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. sebagai dosen pembahas.

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	iii
SANWACANA	x
RIWAYAT HIDUP	xvii
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Biomassa	7
2.2 Kulit Durian.....	9
2.3 Torefaksi.....	10
2.4 Karakteristik Bahan Bakar Padat	11
2.4.1 Analisis Proksimat	12
2.4.2 Analisis Ultimat	12
2.4.3 Nilai Kalor.....	12
2.4.4 Densitas, Hidrofobisitas, dan Grindability.....	13
2.4.5 Komposisi Abu dan Unsur Anorganik.....	13
2.4.6 Aplikasi dalam Sistem Energi.....	13

2.5	Parameter Proses Torefaksi	13
2.5.1	Temperatur	14
2.5.2	Waktu Penahan (Residence Time)	14
2.5.3	Ukuran Partikel	14
2.5.4	Kadar Air.....	15
2.6	Kualitas Produk Torefaksi.....	15
2.6.1	Mass Yield	15
2.6.2	Energi Yield	16
2.6.3	Energi Density.....	16
III.	METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	17
3.1.1	Tempat Penelitian.....	17
3.1.2	Waktu Penelitian	17
3.1.3	Waktu Penelitian	17
3.2	Alat dan Bahan	18
3.3	Rancangan Penelitian	21
3.4	Prosedur Pengujian Torefaksi.....	22
3.4.1	Prosedur Pengujian Torefaksi	22
3.4.2	Prosedur Pengujian Nilai Kalor	23
3.4.3	Prosedur Pengujian Hydrophobicity	25
3.5	Parameter Penelitian	26
3.6	Tahapan Penelitian	27
3.7	Alur Tahapan Penelitian	29
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1	Karakteristik Visual Produk	31
4.2	Nilai Kalor	34
4.2.1	Temperatur 250°C	36
4.2.2	Temperatur 275°C.....	37
4.2.3	Temperatur 300°C	38
4.2.4	Nilai Kalor Keseluruhan	39
4.3	Perbandingan Temperatur dan Waktu Tinggal Terhadap Nilai Kalor ...	42
4.4	Mass Yield.....	44

4.4.1	Mass Yield pada Temperatur 250°C	44
4.4.2	Mass Yield pada Temperatur 275°C	46
4.4.3	Mass Yield pada Temperatur 300°C	47
4.5	Energy Yield.....	49
4.5.1	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 250°C	51
4.5.2	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 275°C	52
4.5.3	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 300°C	54
4.6	Analisis Proksimate	55
4.7	Analisis Ketahanan Air dan Hidrofobisitas (<i>Hydropobicity</i>)	57
V.	PENUTUP	62
5.1	Kesimpulan.....	62
5.2	Saran	63
	DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Perubahan Biomassa Pada Berbagai Rezim Suhu.....	8
Gambar 2.2 Sampel Kulit Durian dengan Kondisi Perlakuan Awal yang Berbeda.....	9
Gambar 3.1 Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas Oil Jacket.....	18
Gambar 3.2 Sampel Biomassa Kulit Durian (Chip).....	20
Gambar 3.3 12 Channel Temperature Recorder Datalogger.....	20
Gambar 4.1 Perubahan Karakter Visual Produk.....	32
Gambar 4.2 Nilai Kalor Temperatur 250°C.....	36
Gambar 4.3 Nilai Kalor Temperatur 275°C.....	37
Gambar 4.4 Nilai Kalor Temperatur 300°C.....	38
Gambar 4.5 Nilai Kalor Keseluruhan Pengujian.....	40
Gambar 4.6 Mass Yield Keseluruhan Pengujian	44
Gambar 4.7 Mass Yield Pada Temperatur 250°C.....	45
Gambar 4.8 Mass Yield Pada Temperatur 275°C.....	46
Gambar 4.9 Mass Yield Pada Temperatur 300°C.....	48
Gambar 4.10 Energy Yield Keseluruhan Pengujian	49
Gambar 4.11 Energy Yield pada Temperatur 250°C.....	51
Gambar 4.12 Energy Yield pada Temperatur 250°C.....	52
Gambar 4.13 Energy Yield pada Temperatur 250°C.....	54
Gambar 4.14 Data Pengujian Proximate.....	55
Gambar 4.15 Data Pengujian Hidrofobisitas	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular	19
Tabel 3.2 Komposisi Kimia Pada Kulit Durian	20
Tabel 4.1 Nilai Kalor Produk Torefaksi	35
Tabel 4.2 Ketahanan Durian Husk Chips Temperatur 250°C Terhadap Air	58
Tabel 4.3 Ketahanan Durian Husk Chips Temperatur 275°C Terhadap Air	58
Tabel 4.4 Ketahanan Durian Husk Chips Temperatur 300°C Terhadap Air	59

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara agraris menghasilkan jutaan ton limbah organik setiap tahunnya. Salah satu limbah pertanian yang jumlahnya sangat melimpah namun belum termanfaatkan secara optimal adalah kulit durian (*Durio zibethinus*). Menurut data produksi buah durian di Indonesia, jumlah buah yang dipanen mencapai lebih dari 700.000 ton per tahun. Dengan komposisi kulit yang mencapai 60–75% dari berat total buah, maka potensi limbah kulit durian diperkirakan lebih dari 400.000 ton per tahun. Sayangnya, limbah ini sebagian besar dibuang begitu saja atau dibakar secara terbuka, yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan baik dari segi udara maupun penumpukan sampah organik (Rahmawati dkk., 2023).

Provinsi Lampung merupakan salah satu daerah penghasil durian di Indonesia dengan tingkat produksi yang relatif tinggi dan cenderung meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Lampung, produksi durian pada tahun 2022 tercatat sebesar 27.495 ton, kemudian meningkat signifikan menjadi lebih dari 45.102 ton pada tahun 2023, dengan sebaran produksi utama berada di Kabupaten Lampung Timur, Lampung Tengah, Lampung Selatan, Pesawaran, dan Tanggamus. Tingginya produksi durian tersebut berimplikasi langsung terhadap meningkatnya timbulan limbah pascakonsumsi, terutama limbah kulit durian, yang hingga saat ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal dan masih diperlakukan sebagai sampah organik (Badan Pusat Statistik Provinsi Lampung., 2023).

Buah durian diketahui memiliki proporsi limbah yang sangat besar, di mana kulit durian menyusun sekitar 60–65% dari total berat buah, sedangkan bagian daging hanya berkisar 20–30%. Dengan mempertimbangkan data produksi durian Lampung tahun 2023, potensi limbah kulit durian yang dihasilkan diperkirakan mencapai 27.000–29.000 ton per tahun. Jumlah tersebut menunjukkan bahwa limbah kulit durian merupakan komponen signifikan dalam timbulan limbah organik daerah. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah ini berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan seperti peningkatan volume sampah di tempat pembuangan akhir serta emisi gas hasil dekomposisi, sehingga diperlukan upaya pengelolaan dan pemanfaatan yang lebih berkelanjutan berbasis potensi lokal (Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung., 2022).

Seiring meningkatnya kebutuhan energi nasional dan kesadaran terhadap keberlanjutan lingkungan, Indonesia menghadapi tantangan besar dalam menyediakan energi yang bersih, terbarukan, dan berkelanjutan. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi yang bersifat tidak terbarukan telah menyebabkan berbagai masalah, mulai dari emisi karbon yang tinggi hingga fluktuasi harga energi yang berdampak pada perekonomian. Oleh karena itu, upaya pemanfaatan limbah organik seperti kulit durian sebagai bahan bakar alternatif merupakan solusi potensial dalam konteks transisi energi nasional (Lya dkk., 2023).

Kulit durian diketahui mengandung senyawa lignoselulosa yang tinggi, dengan komposisi sekitar 60% selulosa, 13% hemiselulosa, dan 15% lignin. Kandungan lignoselulosa yang dominan tersebut menjadikan kulit durian sebagai bahan baku yang sangat potensial untuk dikonversi melalui proses termokimia, karena struktur selulosa dan hemiselulosa mudah terdekomposisi secara terkendali pada temperatur menengah, sementara lignin berperan dalam meningkatkan kandungan karbon tetap dan kestabilan termal produk. Selain itu, proporsi kulit yang mencapai 60–75% dari berat total buah menyebabkan limbah ini tersedia dalam jumlah besar, terutama di daerah sentra produksi

durian, sehingga pemanfaatannya memiliki nilai strategis dalam pengelolaan limbah organik berbasis potensi lokal (Haryati dkk., 2018)..

Proses torrefaksi, yang berlangsung pada suhu 200–300°C dalam kondisi minim oksigen, dipilih karena mampu meningkatkan densitas energi biomassa tanpa menyebabkan kehilangan massa yang terlalu ekstrem seperti pada proses karbonisasi suhu tinggi. Torrefaksi dapat meningkatkan kandungan karbon tetap, menurunkan kadar air dan volatil, serta menghasilkan bahan bakar padat yang lebih stabil, tahan lama, dan memiliki nilai kalor lebih tinggi. Selain meningkatkan kualitas energi, torrefaksi juga memperbaiki sifat hidrofobitas biomassa sehingga produk tidak mudah menyerap kelembapan dan lebih aman dalam penyimpanan maupun distribusi. Dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku yang melimpah, karakteristik kimia yang sesuai, serta kebutuhan energi alternatif yang berkelanjutan, kulit durian menjadi pilihan yang relevan dan potensial untuk diteliti sebagai bahan bakar padat melalui proses torrefaksi (Rahmawati dkk., 2023).

Pemilihan variasi temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C didasarkan pada rentang operasional umum proses torrefaksi yang berada pada kategori *mild* hingga *severe torrefaction* sebagaimana banyak digunakan dalam literatur internasional. Temperatur 250°C merepresentasikan tahap awal dekomposisi hemiselulosa dan pengurangan kadar air, 275°C menggambarkan kondisi optimum peningkatan densitas energi dengan degradasi komponen volatil yang lebih intensif, sedangkan 300°C mendekati batas atas torrefaksi yang menghasilkan peningkatan karbon tetap yang signifikan namun disertai penurunan mass yield yang lebih besar (Pimsamarn dkk., 2024). Sementara itu, variasi waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit dipilih untuk merepresentasikan durasi pemanasan jangka pendek, menengah, dan lebih lama pada skala laboratorium, sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh kinetika reaksi terhadap perubahan sifat bahan bakar. Rentang temperatur dan waktu tersebut secara teoritis telah dilaporkan mampu memberikan peningkatan kualitas energi biomassa tanpa menyebabkan karbonisasi penuh, sehingga sesuai untuk

mengkaji keseimbangan antara *mass yield* dan *energy yield* dalam penelitian ini .

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa kulit durian yang ditorefaksi dapat menghasilkan nilai kalor hingga 6.157 kal/gr, setara dengan batubara sub-bituminus. Selain itu, briket yang dihasilkan memiliki karakteristik pembakaran yang efisien dan rendah emisi, menjadikannya alternatif ideal untuk menggantikan bahan bakar konvensional, terutama dalam skala rumah tangga dan industri kecil di pedesaan. Di sisi lain, proses ini juga mampu meningkatkan nilai ekonomi dari limbah yang sebelumnya tidak bernilai, menciptakan peluang ekonomi baru di sektor energi desa dan industri kreatif berbasis biomassa (Haryati dkk., 2018).

Penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa kulit durian dapat dijadikan briket bioenergi yang berkualitas tinggi. Dalam penelitian tersebut, kulit durian yang dikarbonisasi pada suhu 450°C menghasilkan kadar karbon tetap sebesar 77,87%, kadar air hanya 0,01%, dan nilai kalor mencapai 6.274,29 kcal/kg. Briket yang dihasilkan juga memiliki densitas sebesar 0,99 g/ml dan kekuatan tekan sebesar 15,10 N/cm². Ini menunjukkan bahwa kulit durian tidak hanya potensial dari segi nilai kalor, tetapi juga memiliki kekuatan mekanis yang cukup baik untuk dijadikan bahan bakar padat yang layak digunakan secara praktis di Masyarakat. Lebih lanjut, dalam penelitian yang dilakukan menekankan bahwa pemanfaatan kulit durian sebagai bahan bakar dapat menjadi solusi terhadap dua permasalahan utama sekaligus: limbah organik yang tidak terkelola dan kebutuhan energi yang terus meningkat. Dengan memanfaatkan limbah ini menjadi briket bioenergi, tidak hanya diperoleh sumber energi alternatif yang bersih, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomis dari limbah pertanian yang sebelumnya dianggap tidak berguna. Selain itu, karakteristik pembakaran briket kulit durian yang tidak berasap dan tidak berbau membuatnya sangat cocok untuk digunakan di lingkungan rumah tangga yang minim ventilasi (Nuriana dkk., 2014).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian torefaksi ini adalah sebagai berikut:
Bagaimana mengetahui pengaruh variasi waktu tinggal dan temperature terhadap karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi *durian husk chips*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perubahan nilai kalor pada bahan bakar padat produk torefaksi *durian husk chips*,
2. Menganalisis karakteristik nilai *proximate* bahan bakar sebelum dan sesudah torefaksi,
3. Menentukan tingkat hidrofobisitas sebelum dan setelah torefaksi
4. Menentukan *mass yield* dan *energy yield* terhadap variasi waktu tinggal dan temperatur pada proses torefaksi.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Sampel biomassa adalah *Durio zibethinus* berbentuk *durian husk chips* yang memiliki ukuran seragam.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor torefaksi kontinu tipe tubular sistem *oil jacket* dengan sumber pemanas LPG berskala laboratorium yang ada.
3. Variasi waktu tinggal torefaksi dilakukan dengan 3 waktu tinggal yaitu 10, 20 dan 30 menit.
4. Parameter temperatur sebesar 250°C, 275°C dan 300°C pada bahan bakar padat produk torefaksi biomassa *durian husk chips*

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menguraikan latar belakang masalah secara jelas, tujuan yang memaparkan diadakannya penelitian, 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, durian, torefaksi, klasifikasi torefaksi, dan karakteristik dari bahan bakar padat.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisikan tempat dan waktu penelitian yang akan dilaksanakan, alat dan bahan yang digunakan, serta alur tahapan pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan tentang data hasil pengujian yang sudah dilakukan serta pembahasan dari hasil data yang sudah didapatkan saat proses penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran yang diberikan oleh peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang sumber-sumber yang menjadi referensi bagi penulis dalam penyusunan laporan ini.

LAMPIRAN

Berisi tentang beberapa hal yang mendukung materi yang dibahas dan dapat berguna sebagai pelengkap laporan kerja praktik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

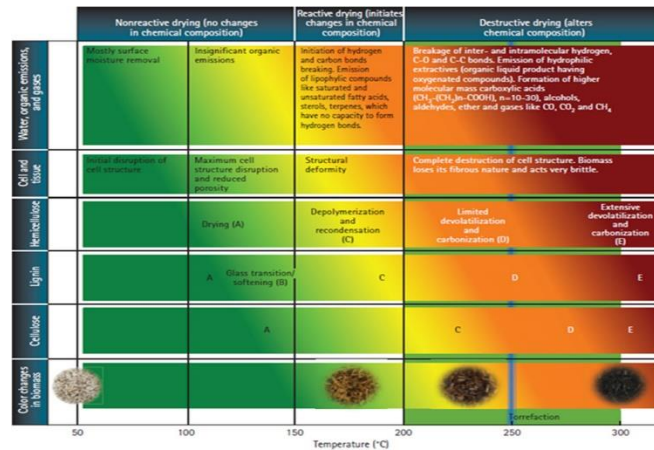
2.1 Biomassa

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik seperti tanaman, hewan, maupun limbah pertanian dan perkebunan. Biomassa dapat dimanfaatkan melalui berbagai proses konversi baik secara termokimia, seperti pembakaran langsung, pirolisis, gasifikasi, maupun secara biokimia, seperti fermentasi. Pemanfaatan biomassa dinilai strategis dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil serta menekan emisi gas rumah kaca (Widjaya dkk., 2018). Selain itu, ketersediaannya yang melimpah di negara agraris seperti Indonesia menjadikan biomassa sebagai sumber energi alternatif yang potensial (Basu P, 2018).

Salah satu jenis biomassa yang menarik untuk diteliti adalah kulit durian (*Durio zibethinus*). Limbah kulit durian jumlahnya sangat banyak terutama pada musim panen, namun umumnya hanya dibuang atau dibakar sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Padahal, kulit durian diketahui memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi, meliputi selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku energi. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kulit durian tidak hanya dapat mengurangi permasalahan limbah, tetapi juga menghasilkan energi terbarukan (Manmeen dkk., 2023).

Proses konversi termokimia seperti pirolisis telah banyak dikaji untuk mengolah kulit durian menjadi biochar dan *bio-oil*. Pirolisis terhadap kulit durian melewati beberapa tahapan dan melibatkan variable-variabel seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa variasi suhu pirolisis berpengaruh terhadap rendemen dan kualitas produk yang

dihasilkan, di mana suhu tinggi cenderung meningkatkan fraksi cair dan gas, sementara suhu lebih rendah mendukung pembentukan biochar (Manmeen dkk., 2023). Produk biochar yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dengan nilai kalor cukup tinggi, sekaligus sebagai material penyerap yang ramah lingkungan (Wang dkk., 2024).



Gambar 2.1 Perubahan Biomassa Pada Berbagai Rezim Suhu (*Frontiers in Energy Research.*, 2021).

Selain bioenergi, kulit durian juga berpotensi menghasilkan produk bernilai tambah seperti biochar aktif untuk aplikasi adsorben. Studi terbaru menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis kulit durian mampu menyerap zat warna sintetis dengan efisiensi yang tinggi setelah dilakukan aktivasi fisik maupun kimia (Faisal dkk., 2024). Hal ini membuktikan bahwa biomassa kulit durian memiliki prospek tidak hanya dalam bidang energi, tetapi juga dalam pengolahan limbah cair industry (Budzińska dkk., 2025).

Kajian mengenai lini produksi briket dari kulit dan cangkang durian bahkan mulai mengintegrasikan konsep *biorefinery*, di mana arus samping dari proses produksi dapat dimanfaatkan menjadi produk bernilai lebih tinggi, sehingga meningkatkan keekonomian dan keberlanjutan. Dengan demikian, biomassa dari kulit durian dapat dipandang sebagai solusi energi terbarukan sekaligus pendekatan pengelolaan limbah yang berkelanjutan (Ly dkk., 2024).

2.2 Kulit Durian

Kulit durian (*Durio zibethinus*) merupakan limbah terbesar dari buah durian sekitar 60–75% dari berat total buah yang sering dibuang tanpa pengolahan, berpotensi menjadi beban lingkungan. Namun, secara kimiawi, kulit durian mengandung komponen lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, lignin) yang signifikan, sehingga potensial sebagai bahan baku bioenergi dan material bernilai tambah. Metode pirolisis dua tahap pada suhu sekitar 500 °C berhasil mengubah kulit durian menjadi biochar dengan kandungan karbon tinggi (70,5%) dan nilai kalor sekitar 6.385 Kcal/kg, serta karakteristik fisik yang menguntungkan seperti luas permukaan 74 m²/g dan pori 0,005 mm, membuka peluang pemanfaatan limbah ini sebagai bahan bakar padat atau adsorben (Anuwattana dkk., 2025).

Hasil dari penelitian menunjukkan berbagai pemanfaatan inovatif: aktivasi karbon dari kulit durian yang menghasilkan biochar/karbon aktif efisien untuk adsorpsi zat warna, dan pengembangan proses *biorefinery* yang menghasilkan briket dengan nilai kalor tinggi (HHV = 33,21 MJ/kg), serta produk bernilai tambah seperti pektin berkadar metoksil tinggi dan karbon aktif berluas permukaan >300 m²/g (Ly dkk., 2024). Alternatif lanjutan meliputi transformasi kulit durian menjadi karbon berpori melalui proses hidrot termal dan aktivasi kimia misalnya dengan KHCO₃ dimana karbon porous ini memiliki luas permukaan sangat tinggi (2100 m²/g) dan kapasitansi spesifik sebesar 267 F/g, menjadikannya calon bahan untuk superkapasitor (Wang dkk., 2025).

Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa perlakuan awal seperti pencacahan, pengeringan sinar matahari, dan pengeringan konveksi berpengaruh signifikan terhadap kualitas kulit durian sebagai biomassa. Sampel dengan kondisi perlakuan berbeda disajikan pada Gambar 2.2. Contohnya, pengeringan konveksi selama 24 jam mampu menurunkan kadar air kulit durian dari 76,82% menjadi 8,02%, meskipun variasi kadar air antar sampel masih tinggi akibat struktur berlapis yang sulit melepaskan kelembapan. Untuk mendapatkan

material yang standar dan efisien dalam konversi menjadi biochar, diperlukan penambahan waktu pengeringan atau pencacahan lebih halus sebelum proses pengeringan. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan pra-pengolahan sangat penting dalam meningkatkan kualitas kulit durian sebagai bahan biomassa (Lya dkk, 2023).



Gambar 2.2 Sampel Kulit Durian dengan Kondisi Perlakuan Awal yang Berbeda (Lya dkk, 2023).

2.3 Torefaksi

Torrefaksi adalah perlakuan termal ringan pada biomassa (umumnya 200–320 °C) yang berlangsung dalam atmosfer inert atau reduktif untuk menghilangkan sebagian besar senyawa volatil dan meningkatkan densitas energi serta kestabilan fisik bahan bakar padat yang dihasilkan. Proses ini membuat biomassa lebih hidrofobik, lebih mudah digiling, serta memiliki nilai kalor yang lebih tinggi sehingga cocok digunakan sebagai bahan bakar padat alternatif (Gizaw, 2024; Zhou dkk., 2024).

Pada penelitian khusus terhadap kulit durian, studi eksperimental menunjukkan bahwa suhu torrefaksi dan waktu tinggal sangat memengaruhi *mass yield*, nilai kalor atas (*higher heating value*), serta kandungan kimiawi seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Torrefaksi pada suhu 200–300 °C meningkatkan HHV dan densitas energi namun menurunkan hasil massa. Selain itu, perbedaan atmosfer (N₂ vs. udara) juga mengubah laju devolatilisasi dan karakteristik produk akhir (Pimsamarn dkk., 2024).

Secara mikrostruktur dan kimia, torrefaksi menyebabkan dekomposisi hemiselulosa dan sebagian selulosa, meningkatkan fraksi lignin relatif, serta mengubah fungsionalitas permukaan. Perubahan ini menjelaskan peningkatan

hidrofobisitas dan stabilitas penyimpanan pada biomassa hasil torrefaksi dari limbah buah dan sayuran (Škorjanc dkk., 2025; Sousa dkk., 2024).

Dari sisi teknologi, berbagai rancangan reaktor seperti *moving bed*, *rotary drum*, dan *fluidized bed* banyak digunakan dalam penelitian dan skala pilot. Pemilihan jenis reaktor bergantung pada skala operasi, kebutuhan kontrol atmosfer, serta tujuan pemrosesan gas hasil torrefaksi. Pada penelitian kulit durian skala laboratorium, reaktor *batch* atau *rotary drum* sederhana sering menjadi pilihan karena mudah dioperasikan (Frontiers in Energy Research, 2021).

Dalam konteks pemanfaatan limbah kulit durian, torrefaksi berpotensi menghasilkan biocoal atau briket dengan nilai energi lebih tinggi dibandingkan kulit mentah. Namun, penelitian terbaru menekankan pentingnya optimasi parameter (suhu, waktu, atmosfer) dengan pendekatan *design of experiment* serta analisis ekonomi untuk memastikan kelayakan implementasi pada skala komersial (Pimsamarn dkk., 2024; Gizaw, 2024).

2.4 Karakteristik Bahan Bakar Padat

Karakteristik bahan bakar padat merupakan faktor utama dalam menilai kualitas biomassa hasil torrefaksi. Proses torrefaksi menghasilkan perubahan signifikan pada sifat fisik dan kimia biomassa, antara lain peningkatan nilai kalor, penurunan kadar air, peningkatan hidrofobisitas, serta kemudahan dalam penggilingan. Analisis karakteristik ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana produk torrefaksi layak digunakan sebagai sumber energi alternatif yang efisien dan berkelanjutan (Çetinkaya, 2024).

Selain itu, karakterisasi bahan bakar padat penting dilakukan untuk memprediksi kinerja biomassa saat digunakan dalam sistem energi, baik untuk pembakaran langsung maupun co-firing dengan batubara. Hal ini mencakup evaluasi terhadap sifat pembakaran, stabilitas penyimpanan, potensi pembentukan emisi, serta risiko teknis seperti fouling dan slagging. Dengan

demikian, karakterisasi menyeluruh mampu memberikan gambaran utuh mengenai manfaat maupun tantangan penggunaan biomassa torrefaksi pada skala industri (Gizaw, 2024).

2.4.1 Analisis Proksimat

Analisis proksimat meliputi pengukuran kadar air, volatile matter, fixed carbon, dan abu. Kadar air yang rendah menunjukkan biomassa lebih stabil dalam penyimpanan dan memiliki densitas energi lebih tinggi. *Volatile matter* berhubungan dengan kecepatan penyalan dan kestabilan nyala api, sedangkan *fixed carbon* menentukan jumlah energi yang dapat dilepaskan selama proses pembakaran. Kandungan abu penting dianalisis karena dapat memicu terjadinya kerak (*slagging*) dan *fouling* pada sistem pembakaran (Çetinkaya, 2024).

2.4.2 Analisis Ultimat

Analisis ultimat bertujuan mengukur kandungan unsur karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), dan oksigen (O). Kandungan karbon yang tinggi setelah torrefaksi berhubungan langsung dengan peningkatan nilai kalor. Sebaliknya, kadar oksigen yang menurun menandakan peningkatan kualitas energi biomassa. Analisis ini juga penting untuk memperkirakan emisi gas buang, misal sulfur oksida (SO_x) dan nitrogen oksida (NO_x) yang berhubungan dengan dampak lingkungan dari penggunaan biomassa sebagai bahan bakar (Gizaw, 2024).

2.4.3 Nilai Kalor

Nilai kalor terdiri dari *Higher Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV biomassa torrefaksi umumnya lebih tinggi dibandingkan biomassa mentah karena adanya konsentrasi karbon yang lebih besar dan berkurangnya kadar air. Parameter ini menjadi indikator utama efisiensi energi biomassa serta relevan dalam perancangan sistem pembakaran.

2.4.4 Densitas, Hidrofobisitas, dan Grindability

Torefaksi meningkatkan kepadatan energi biomassa dengan menurunkan kadar air serta memperbaiki sifat mekanik. Biomassa torrefaksi juga menjadi lebih rapuh (brittle), sehingga memudahkan proses penggilingan. Selain itu, sifat hidrofobik yang meningkat membuat biomassa lebih tahan terhadap kelembapan, sehingga lebih stabil dalam penyimpanan jangka panjang. Peningkatan sifat fisik ini berdampak positif terhadap aspek logistik, termasuk transportasi dan penyimpanan bahan bakar (Çetinkaya, 2024).

2.4.5 Komposisi Abu dan Unsur Anorganik

Komposisi abu biomassa mencakup unsur alkali seperti natrium (Na), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), serta unsur lain seperti klorin (Cl) dan sulfur (S). Kandungan unsur tersebut dapat menyebabkan fouling, slagging, dan korosi pada sistem pembakaran. Karena itu, analisis abu penting untuk memperkirakan dampak teknis dan lingkungan yang timbul saat biomassa digunakan sebagai bahan bakar (Gizaw, 2024).

2.4.6 Aplikasi dalam Sistem Energi

Hasil karakterisasi biomassa torrefaksi menjadi dasar untuk menentukan kesesuaian bahan bakar pada berbagai aplikasi energi, misalnya pembakaran langsung, co-firing dengan batubara, gasifikasi, maupun pirolisis lanjutan. Dengan memahami parameter proksimat, ultimat, nilai kalor, sifat fisik, dan komposisi abu, peneliti dan praktisi dapat mengoptimalkan penggunaan biomassa torrefaksi untuk mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi serta mengurangi dampak lingkungan (Çetinkaya, 2024; Gizaw, 2024).

2.5 Parameter Proses Torefaksi

Proses torrefaksi dipengaruhi oleh sejumlah parameter yang berperan langsung terhadap kualitas bahan bakar padat yang dihasilkan. Parameter-parameter

utama meliputi temperatur, waktu penahanan (residence time), ukuran partikel, laju pemanasan, kadar air awal, atmosfer reaktor, dan konfigurasi proses. Pengaturan parameter ini akan menentukan keseimbangan antara peningkatan nilai kalor, sifat fisik (hidrofobisitas, grindability), dan rendemen massa padat (Pimsamarn dkk., 2024).

2.5.1 Temperatur

Temperatur merupakan faktor paling dominan dalam torrefaksi. Proses ini umumnya berlangsung pada 200–300 °C, dengan kategori mild torrefaction (<240 °C), severe torrefaction (260–300 °C). Temperatur rendah terutama menguapkan air dan sebagian hemiselulosa, sedangkan temperatur tinggi meningkatkan fraksi karbon tetap dan nilai kalor. Namun, semakin tinggi temperatur, semakin besar pula penurunan rendemen massa padat (Pradeep dkk., 2024).

2.5.2 Waktu Penahan (Residence Time)

Waktu penahanan menunjukkan lamanya biomassa terekspos pada temperatur proses. Rentang umum adalah 10–60 menit, dengan 20–40 menit dianggap optimal untuk banyak jenis biomassa. Waktu yang lebih lama memperkuat dekomposisi hemiselulosa dan meningkatkan nilai kalor, tetapi juga menurunkan rendemen padat secara signifikan (Pimsamarn dkk., 2024).

2.5.3 Ukuran Partikel

Ukuran partikel biomassa memengaruhi laju perpindahan panas dan massa. Partikel kecil (1–10 mm) memanaskan lebih cepat sehingga proses lebih merata, sementara partikel besar memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi torrefaksi di inti partikel. Pemilihan ukuran partikel merupakan kompromi antara homogenitas produk dan biaya penggilingan (Pradeep dkk., 2024).

2.5.4 Kadar Air

Kadar air awal (feed moisture content) memengaruhi kebutuhan energi awal dan efektivitas torrefaksi. Kadar air yang tinggi meningkatkan konsumsi energi untuk penguapan sehingga menurunkan efisiensi. Umumnya, biomassa dikeringkan terlebih dahulu hingga kadar air 5–15% sebelum proses torrefaksi (Pradeep dkk., 2024).

2.6 Kualitas Produk Torefaksi

Kualitas bahan bakar padat hasil torrefaksi umumnya dinilai menggunakan tiga besaran utama, yaitu mass yield, energy density, dan energy yield. Ketiga parameter ini saling terkait dan menjadi indikator penting untuk menilai efektivitas proses torrefaksi dalam meningkatkan kualitas energi biomassa

2.6.1 Mass Yield

Mass yield didefinisikan sebagai perbandingan massa padatan hasil torrefaksi terhadap massa biomassa awal dalam kondisi kering. Parameter ini menunjukkan sejauh mana kehilangan massa akibat dekomposisi hemiselulosa, pelepasan senyawa volatil, serta penguapan air. Nilai *mass yield* yang lebih rendah umumnya terjadi pada temperatur dan waktu penahanan yang lebih tinggi karena intensitas dekomposisi semakin besar.

$$MY_{daf} = \frac{m_{t_{daf}}}{m_{0_{daf}}} \dots \dots \dots (1)$$

$$MY_{db} = \frac{m_{t_{db}}}{m_{0_{db}}} \dots \dots \dots (2)$$

$$MY_{ar} = \frac{m_{t_{ar}}}{m_{0_{ar}}} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

MY_{daf} : Mass yield “dry ash free”

MY_{db} : Mass yield “dry based”

MY_{ar} : Mass yield “as-received”

$m_{t_{daf}}$: Massa total biomassa tertorefaksi “dry ash free”

$m_{t_{db}}$: Massa total biomassa tertorefaksi “dry based”

- m_{tar} : Massa total biomassa tertorefaksi “*as-received*”
 m_{daf} : Massa total sampel biomassa tanpa air dan tanpa abu
 m_{db} : Massa total sampel biomassa kering
 m_{ar} : Massa total sampel pada kondisi awal, kadar air dan abu.

2.6.2 Energi Yield

Energy yield merupakan kombinasi dari *mass yield* dan *energy density* yang menggambarkan jumlah energi yang masih terkandung dalam produk padat relatif terhadap biomassa awal. Parameter ini sangat penting karena menunjukkan keseimbangan antara kehilangan massa dan peningkatan kualitas energi. *Energy yield* yang optimal diperoleh pada kondisi torrefaksi menengah, di mana peningkatan nilai kalor tidak terlalu mengorbankan rendemen massa.

$$EY = \frac{m_t HHV_t}{m_0 HHV_0} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana:

EY : *Energy Yield*

m_t : Massa padatan produk setelah torefaksi

m_0 : Massa umpan awal biomassa sebelum torefaksi

HHV_t : *Higher Heating Value* (HHV) produk torefaksi

HHV_0 : *Higher Heating Value* (HHV) biomassa mentah

2.6.3 Energi Density

Energy density merujuk pada peningkatan nilai kalor produk padat dibandingkan biomassa mentah. Proses torrefaksi menyebabkan penurunan unsur oksigen dan hidrogen, sehingga fraksi karbon tetap lebih dominan dan meningkatkan nilai kalor spesifik. Dengan demikian, biomassa yang telah melalui torrefaksi memiliki kualitas energi yang lebih tinggi per satuan massa.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Berikut merupakan tempat dan waktu penelitian yang akan dilakukan oleh penulis antara lain:

3.1.1 Tempat Penelitian

Lokasi penelitian dilaksanakan di Hanggar dan Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung dan di Laboratorium Energi Baru dan Terbarukan, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam jangka waktu yang diperkirakan dari Oktober 2025 - Januari 2026

3.1.3 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data pengujian yang dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 - Januari 2026 di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung dan Hanggar Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung serta bekerjasama dengan Laboratorium Energi Baru dan Terbarukan Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini terdapat alat utama dan alat pendukung seperti pada Gambar 3.1 berikut

1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket*.



Gambar 3.1 Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket*

Alat utama yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain: reaktor torefaksi tipe tubular seperti pada Gambar 3.1, pemantik api, gas LPG 12 kg, regulator LPG, *thermocouple* tipe K, 12 *Channel Temperature Recorder Datalogger*. Sedangkan alat pendukung yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain: timbangan digital, laptop, *stopwatch*, kamera, plastik kedap udara, baterai dan kabel listrik. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem 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 Luar	: 203,1 mm
Diameter Tabung Dalam	: 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>	: 1 unit @ 0,5 Hp
<i>Ratio Gear Reducer</i>	: 2 unit @ 1: 60
• Medium Pemanas	
Jenis Medium Pemanas	: <i>Heat transfer oil cafloTM AF</i>
Merek Medium Pemanas	: Petro Canada
Temperatur Maksimum	: 375 °C
Tekanan Kerja	: 1 atm
• Sistem Pembakaran	
Ruang Bakar	: <i>Horizontal Burner</i>
Bahan Bakar	: <i>Liquefied Petrileum Gas (LPG)</i>
• Sistem Kontrol Temperatur	
Sensor Temperatur	: <i>Thermocouple tipe K</i>
• Sistem Pendingin <i>Cooling Char</i>	
Sistem Sirkulasi Air	: <i>Water Pump</i>

2. Sampel Kulit Buah Durian (*Durian husk chips*)

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kulit buah durian dengan berat 500gram seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Kulit durian yang digunakan berasal dari lingkungan sekitar Bandar Lampung. Kulit durian tersebut dicacah dengan ukuran 3-5cm agar dimensinya menjadi kecil sehingga memudahkan proses torefaksi.

Tabel 3.2 Komposisi Kimia Pada Kulit Durian

Selulosa	$\pm 60\%$
Hemiselulosa	$\pm 13\%$
Lignin	$\pm 15\%$
Komponen lain (abu, ekstraktif, pati, dll.)	$\pm 5-10\%$



Gambar 3.2 Sampel Biomassa Kulit Durian (Chip)

3. *Memory Logger*

Memory logger berfungsi untuk memantau dan merekam kondisi lingkungan atau proses, seperti suhu dan kelembapan, yang sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal. Alat ini memungkinkan pengukuran suhu pada berbagai titik dalam proses seperti yang terlihat pada Gambar 3.3, yang langsung mempengaruhi kualitas dan konsistensi produk akhir. Data yang terekam juga bisa dianalisis untuk meningkatkan efisiensi

proses, menjaga kualitas produk, dan mengidentifikasi masalah pada mesin atau prosedur jika hasil yang diinginkan tidak tercapai.



Gambar 3.3 12 Channel Temperature Recorder Datalogger

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.

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel biomassa *durian husk chip* dengan ukuran yang tidak seragam atau berbentuk *husk chip*. Sampel dilakukan perlakuan proses torefaksi dengan tiga variasi waktu tinggal (*residence time*) diantaranya 10, 20, dan 30 menit dengan dua variasi temperatur sebesar 250°C, 275°C dan 300°C. Massa sampel biomassa *durian husk chip* dari masing-masing waktu tinggal yang akan digunakan adalah 500 gram, sehingga total massa biomassa untuk semua variasi waktu tinggal dan temperatur pada penelitian ini adalah 4,5 kg. Rancangan penelitian ini adalah dengan mengamati beberapa parameter diantaranya nilai kalor, nilai *proximate*, *mass yield*, *energy yield* dan *hydropobicity*.

3.4 Prosedur Pengujian Torefaksi

3.4.1 Prosedur Pengujian Torefaksi

Adapun prosedur pengujian torefaksi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat yang akan digunakan dalam pengujian baik alat utama dan alat pendukung.
2. Mempersiapkan bahan utama yang akan diujikan yaitu sampel biomassa.
3. Memasangkan Pulley dan belt sesuai dengan waktu tinggal yang diinginkan ke gearbox pada reaktor.
4. Menghubungkan tabung LPG 12 kg ke regulator dan meletakan tabung LPG 12 kg ke dalam baskom yang berisi air sirkulasi cooling char.
5. Menghubungkan pompa air sirkulasi ke cooling char dengan menggunakan selang.
6. Memasang seluruh thermocouple yang ada pada reaktor dan cooling char ke temperature recorder datalogger.
7. Menghidupkan motor penggerak screw conveyor dengan cara menghubungkan kabel listrik pada reaktor ke terminal, lalu tekan tombol “on” pada reaktor.
8. Menyalakan api burner dengan bantuan pematik api dan mengatur bukaan katup pada regulator LPG dan katup aliaran gas pada reaktor.
9. Menunggu temperatur T1, T2 dan T3 mencapai temperatur 275°C.
10. Menjaga temperatur T1, T2 dan T3, apabila sudah mencapai temperatur yang diinginkan supaya tetap stabil dengan mengatur katup pada regulator LPG dan tunggu 10-15 menit sampai temperatur stabil.
11. Memasukkan sampel durian husk chip ke dalam reaktor melalui hooper dan menunggu sampel keluar dengan residence time selama 30 menit.
12. Mendorong pendorong besi pada cooling char, setelah 30 menit

sesaat sampel dimasukkan ke dalam reaktor dan membuka katup pengeluaran pada cooling char.

13. Menaikan temperatur dengan memperbesar bukaan katup regulator LPG hingga T1, T2 dan T3 mencapai temperatur 275°C dan 300°C dan ulangi langkah 11 – 12.
14. Ulangi langkah 7 – 12 untuk variasi waktu tinggal yang akan diujikan yaitu 10 dan 20 menit dengan menukar pulley pada gearbox.

3.4.2 Prosedur Pengujian Nilai Kalor

Prosedur pengujian nilai kalor menggunakan Oxygen Bomb Calorimeter adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan unit Bomb Calorimeter dan memastikan area sekitar unit bersih serta tidak ada rembesan air.
2. Memasang steker unit ke stop kontak.
3. Menyalakan unit dengan menekan tombol power hingga tombol berwarna merah dan layar sudah menyala.
4. Mengeluarkan sensor temperatur yang ada di bagian atas unit tepatnya pada tutup bucket unit.
5. Membuka tutup bucket unit dengan posisi $\pm 90^\circ$ ke atas.
6. Mengeluarkan inner bucket untuk disiapkan, siapkan komponen lainnya yaitu oxygen bomb, crucible, dan ignition wire.
7. Menyiapkan oxygen bomb head holder yang digunakan sebagai dudukan pada saat proses pemasangan kawat pada oxygen bomb.
8. Membersihkan semua komponen yang telah disiapkan setiap sebelum pengujian dilakukan.
9. Memastikan sampel yang digunakan bersih dan layak untuk dilakukan proses pengujian.
10. Menyiapkan sampel yang akan diuji sebanyak 1 gram (jika sampel tidak pas 1 gram maka isi sampel sesuai berat sampel).
11. Menyiapkan timbangan yang telah dikalibrasi.
12. Melakukan penimbangan terhadap crucible yang akan digunakan.

13. Melakukan kalibrasi atau nolkan kembali timbangan untuk menimbang sampel yang akan diuji.
14. Menambahkan sampel secara perlahan ke dalam crucible hingga mencapai berat yang diinginkan dengan menggunakan sendok atau spatula bersih.
15. Mengangkat crucible dengan penjepit atau alat bantu lain untuk menghindari kontaminasi, lalu letakkan di dalam bomb calorimeter.
16. Membuka bomb cylinder dengan memutar berlawanan arah jarum jam hingga bomb cylinder bisa dipisahkan dengan header bomb.
17. Menempatkan header bomb di head holder.
18. Meletakkan crucible yang telah diisi dengan sampel uji ke crucible holder.
19. Memasang kawat ignition, pastikan menyentuh permukaan dalam sampel dan tidak boleh menyentuh crucible serta klem kawat untuk menjaga kawat tetap terhubung dengan baik.
20. Mengisi bomb cylinder dengan aquadest sebanyak 10 ml.
21. Memasang kembali header bomb ke bomb cylinder dengan memutar bagian bomb cylinder searah jarum jam secara hati-hati agar menjaga kawat dan sampel dalam crucible tetap berada dalam kondisi yang sama.
22. Memasukkan oksigen ke dalam bomb oxygen dengan nepel oxygen yang dipasangkan ke inlet bomb oxygen, dengan tekanan 2,8-3 MPa.
23. Mengisi inner bucket dengan air temperatur ruang sampai menutup atau setengah dari inlet oxygen dan masukkan kembali sesuai posisi semula.
24. Memasukkan bomb oxygen ke dalam inner bucket dengan menggunakan holder yang telah disediakan.
25. Menutup cover bucket dengan rapat dan memasukkan kembali sensor temperatur pada posisinya.
26. Membuka tampilan jendela utama dan pilih "Self-Inspection"

kemudian klik “On” pada stirring motor untuk melakukan mixing pada bucket sebelum pengujian dilakukan, setelah 1 menit, klik “Off”.

27. Melakukan klik back untuk kembali ke jendela utama dan masuk ke menu “Data Setting” serta memasukkan berat sampel dan data kalibrasi.
28. Melakukan klik “Start” untuk memulai pengujian dan hasil pengujian akan menampilkan nilai pada kotak layar dalam satuan cal/g.
29. Mengeluarkan sensor temperatur pada cover unit apabila pengujian telah selesai.
30. Membuka cover unit dan mengeluarkan bomb calorimeter dari inner bucket dengan mengangkatnya menggunakan holder.
31. Mengeluarkan oksigen pada bomb oxygen menggunakan alat yang disiapkan dengan menekan katup bomb oxygen sampai oksigen tidak bersisa.
32. Membuka head bomb dari bomb cylinder dan membersihkan seluruh komponen yang telah digunakan.
33. Melakukan tahapan yang sama untuk setiap pengujian selanjutnya.

3.4.3 Prosedur Pengujian *Hydrophobicity*

Prosedur uji *hydrophobicity* yang diterapkan pada wood chip adalah sebagai berikut:

1. Siapkan sampel wood chip yang akan diuji.
2. Siapkan wadah berisi air dengan volume yang cukup untuk merendam sampel.
3. Masukkan sampel ke dalam wadah air dan pastikan seluruh bagian terendam..
4. Catat waktu saat sampel mulai bersentuhan dengan air..
5. Amati kekeruhan air dan perubahan fisik seperti pembengkakan atau retak selama perendaman.
6. Tentukan waktu hingga sampel mulai hancur atau kehilangan

bentuk aslinya.

7. Catat hasil pengujian dan simpulkan tingkat ketahanan wood chip terhadap air.

3.5 Parameter Penelitian

Parameter utama yang digunakan dalam penelitian torefaksi ini terdiri dari tiga variabel kunci, yaitu temperatur, waktu tinggal, dan ukuran sampel. Variasi temperatur ditetapkan pada 250°C, 275°C, dan 300°C. Rentang temperatur ini dipilih karena merupakan zona kerja torefaksi yang paling efektif untuk biomassa lignoselulosa, di mana hemiselulosa mulai terdekomposisi pada suhu 200 - 260°C, selulosa mulai terpengaruh pada 260 - 320°C, sementara lignin mengalami dekomposisi secara bertahap pada suhu yang lebih tinggi. Dengan itu, penggunaan tiga titik temperatur ini diharap dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perubahan komposisi kimia dan sifat energi biomassa pada tahap awal, menengah, hingga mendekati batas atas torefaksi. Waktu tinggal ditetapkan selama 30 menit pada setiap variasi temperatur. Pemilihan durasi ini didasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa waktu sekitar 20 - 40 menit sudah cukup untuk menghasilkan produk padat dengan kestabilan termal yang baik, tanpa menyebabkan kehilangan massa berlebih akibat pelepasan volatil secara berlebihan. Dengan waktu 30 menit, proses pemanasan dianggap seimbang antara efisiensi energi dan kualitas produk torefaksi, sehingga hasil yang diperoleh dapat dijadikan rujukan praktis dalam pengembangan reaktor skala lebih besar.

Secara keseluruhan, kombinasi dari tiga parameter ini diharapkan mampu memberikan pemahaman menyeluruh mengenai kondisi operasional yang paling efektif untuk menghasilkan biomassa padat dengan nilai kalor tinggi, kadar air rendah, serta sifat hidrofobisitas yang lebih baik. Pada penelitian ini juga mencakup seberapa jauh proses torefaksi dapat meningkatkan kualitas sifat-sifat pembakaran dari sampel biomassa pada kondisi *as-received* dengan mencari nilai *mass yield* dan *energy yield*. Hal ini penting dalam konteks

peningkatan kualitas energi biomassa seperti kayu karet, sehingga keduanya dapat menjadi alternatif bahan bakar padat yang lebih ramah lingkungan sekaligus bernilai ekonomis.

3.6 Tahapan Penelitian

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

1. Studi Literatur : Tahapan awal penelitian dilakukan melalui studi literatur yang bersumber dari jurnal ilmiah, buku teks, dan laporan penelitian terkait biomassa, proses torefaksi, reaktor torefaksi, karakteristik bahan bakar padat, mekanisme reaksi torefaksi, serta potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif. Studi literatur ini bertujuan untuk memperoleh landasan teori yang kuat dan mendukung perumusan metodologi penelitian.
2. Persiapan Bahan Baku : Pada tahap ini dilakukan persiapan bahan baku berupa kulit durian (durian husk) yang meliputi pembersihan, pemotongan menjadi ukuran chips, serta pengeringan awal untuk mengurangi kadar air. Persiapan bahan baku bertujuan untuk memperoleh sampel yang homogen dan sesuai dengan kebutuhan proses torefaksi.
3. Persiapan Alat Torefaksi : Tahapan selanjutnya adalah persiapan alat torefaksi yang akan digunakan dalam penelitian. Persiapan ini meliputi penyesuaian *pulley* sesuai dengan variasi waktu tinggal, pemeriksaan kondisi reaktor, serta penggantian komponen yang mengalami kerusakan seperti thermocouple. Selain itu, dilakukan pengadaan peralatan pendukung berupa pemantik api, gas LPG, wadah sampel, timbangan digital, dan 12 *channel temperature recorder datalogger*.
4. Kalibrasi dan Pengujian Awal Alat : Sebelum proses torefaksi dilakukan, seluruh peralatan diuji dan dikalibrasi untuk memastikan sistem bekerja dengan baik dan data temperatur yang dihasilkan akurat. Tahapan ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran selama proses pengujian berlangsung.
5. Proses Torefaksi Biomassa : Proses torefaksi dilakukan dengan menggunakan sampel durian husk chips untuk setiap variasi waktu tinggal,

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Nilai kalor bahan bakar padat hasil torefaksi durian husk chips mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur dan waktu tinggal. Hal ini menunjukkan bahwa proses torefaksi mampu meningkatkan kualitas energi biomassa melalui proses devolatilisasi yang menyebabkan berkurangnya komponen volatil dan meningkatnya fraksi karbon tetap pada bahan bakar padat.
2. Hasil analisis *proximate* menunjukkan bahwa proses torefaksi mempengaruhi komposisi kimia biomassa. Terjadi penurunan kadar air (*moisture content*) dan *volatile matter* serta peningkatan *fixed carbon* setelah proses torefaksi. Pada kondisi temperatur 300°C dan waktu tinggal 30 menit, kadar air menurun dari 10,66% menjadi 7,70% dan *volatile matter* menurun dari 83,40% menjadi 75,37%, yang menunjukkan terjadinya proses devolatilisasi dan pemekatan karbon selama pemanasan sehingga meningkatkan kualitas pembakaran biomassa.
3. Proses torefaksi juga meningkatkan sifat hidrofobisitas biomassa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa produk torefaksi memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penyerapan air dibandingkan bahan mentah. Nilai hidrofobisitas tertinggi diperoleh pada temperatur 300°C dengan nilai sebesar 192,36%, yang menunjukkan bahwa proses torefaksi mampu mengurangi sifat hidrofilik biomassa sehingga meningkatkan stabilitas penyimpanan bahan bakar padat.
4. Nilai *mass yield* dan *energy yield* dipengaruhi oleh variasi temperatur dan waktu tinggal selama proses torefaksi. Peningkatan temperatur dan waktu

tinggal menyebabkan terjadinya penurunan *mass yield* akibat dekomposisi termal komponen biomassa. Penurunan *mass yield* tersebut turut mempengaruhi nilai *energy yield* yang cenderung menurun meskipun nilai kalor produk meningkat. Hal ini menunjukkan adanya keseimbangan antara peningkatan kualitas energi bahan bakar dan efisiensi retensi energi total pada proses torefaksi.

Secara keseluruhan, variasi temperatur dan waktu tinggal pada proses torefaksi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik dan kualitas energi bahan bakar padat dari kulit durian, sehingga pemilihan kondisi operasi yang tepat menjadi faktor penting dalam pengembangan biomassa kulit durian sebagai sumber energi alternatif.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut: Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan analisis *ultimate* secara lebih mendalam untuk memperkuat keterkaitan antara perubahan karakteristik fisik–ekimia biomassa dengan peningkatan nilai kalor serta penurunan *mass yield* dan *energy yield*. Analisis tersebut diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme perubahan sifat bahan bakar padat akibat proses torefaksi.

Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi variasi kondisi operasi yang lebih luas, seperti rentang temperatur yang lebih rendah atau waktu tinggal yang lebih singkat, guna memperoleh kondisi torefaksi yang optimal dengan keseimbangan antara peningkatan kualitas energi dan efisiensi energi total. Pengujian karakteristik lanjutan, seperti analisis *ultimate* atau uji performa pembakaran, juga dapat dilakukan untuk mendukung potensi pemanfaatan produk torefaksi kulit durian sebagai bahan bakar padat alternatif pada aplikasi skala industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Anuwattana, R., Soparatana, N., V, S., Phuangngamphan, P., & Tepinta, S. (2025). The preliminary study of two-stage pyrolysis durian shell to biochar. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(21s), 826–829. <https://doi.org/10.64252/b46c8129>
- Badan Pusat Statistik Provinsi Lampung. (2023). *Produksi Tanaman Buah-buahan Tahunan Provinsi Lampung*. <https://lampung.bps.go.id/id>
- Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory (2nd ed.). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00808-3>
- Budzińska, K., Kobylecka, J., & Kosowska-Golachowska, M. (2025). Study of the Reactive Red 120 adsorption of activated carbon derived from durian peel activated by Na_2CO_3 . *Polish Journal of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/xxxx>
- Çetinkaya, B. (2024). Effect of biomass torrefaction on the fuel properties of biopellets. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.XXXX>
- Chen, W.-H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Chen, W.-H., Lin, B.-J., Huang, M.-Y., & Chang, J.-S. (2022). Characteristics of biomass torrefaction in terms of mass yield, energy yield, and proximate analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111817. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111817>
- Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung. (2022). *Food Loss and Food Waste Provinsi Lampung*.
- Faisal, M., Ramadhani, P., Desvita, H., Nyamiati, R. D., Setyaningtyas, W. A., & Fadhillah, U. (2024). Physically and chemically activated durian rind biochar

- as an adsorbent for indigo carmine dye. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100997.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100997>
- Frontiers in Energy Research. (2021). *Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts*. Frontiers. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.642011>
- Gizaw, D. G. (2024). Advances in solid biofuels production through torrefaction: A review. *Energy Reports*, 10(1), 4550–4565.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.067>
- Gizaw, D. G. (2024). Advances in solid biofuels production through torrefaction: Effects on fuel quality and process implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.XXXX>
- Haryati, S., Rahmatullah, & Putri, R. W. (2018). Torrefaction of durian peel and bagasse for bio-briquette as an alternative solid fuel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1), 012008.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012008>
- Kaewtrakulchai, N., Wongrerkrdee, S., Chalermksinsuwan, B., Samsalee, N., & Huang, C. W. (2025). Hydrophobicity and performance analysis of beverage and agricultural waste torrefaction for high-grade bio-circular solid fuel. *Carbon Resources Conversion*, 8(1), 100243.
<https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100243>
- Li, Y., Chen, X., Wang, S., & Zhang, Y. (2023). Effect of torrefaction temperature on fuel properties and combustion behavior of agricultural biomass. *Bioresource Technology*, 369, 128420.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128420>
- Ly, T. B., Trinh, A. M. H., Tran, H. P. T., Dang, K. N., Nguyen, T. D. T., Tran, V. T., & Le, P. K. (2024). Evaluation of an operating durian shell charcoal briquette manufacturing line and development of a biorefinery process for higher value products. *Energy*, 307, 132727.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132727>
- Mahdie, M. F., Nugroho, Y. S., & Hidayat, M. (2016). Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor counter-

- flow multi baffle (COMB). *Jurnal Teknik Kimia*, 10(2), 45–52.
- Manmeen, A., Kongjan, P., Palamanit, A., Kaewkannetra, P., & Reungsang, A. (2023). The biochar and pyrolysis-liquid characteristics of three indigenous durian peels. *Biomass & Bioenergy*, 174, 106816. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106816>
- Nuriana, W., Anisa, N., & Martana (2014). Synthesis preliminary studies durian peel bio briquettes as an alternative fuels. 47, 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.228>
- Nhuchhen, D. R., & Basu, P. (2014). Torrefaction of biomass: A review on basic principles and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.034>
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Pimsamarn, J., Kaewtrakulchai, N., Wisetsai, A., Mualchontham, J., Muidaeng, N., Jiraphothikul, P., Autthanit, C., & Eiad-Ua, A. (2024). Torrefaction of durian peel in air and N₂ atmospheres: Impact on chemical properties and optimization of energy yield using multilevel factorial design. *Results in Engineering*, 23, 102767. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102767>
- Pimsamarn, J., Yamsaengsung, R., Wongkanya, R., & Tipsuwan, T. (2024). Torrefaction of durian peel in air and N₂ atmospheres: Impact on chemical properties and optimization of energy yield using multilevel factorial design. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113456. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113456>
- Pradeep, M., Kumar, A., & Singh, R. (2024). Experimental investigation of the impact of torrefaction parameters on the fuel properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 251, 108756. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108756>
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 77(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.01.002>
- Rahmawati, S., Afadil, Suherman, Santoso, T., Abram, P. H., & Rabasia. (2023).

- The utilization of durian peels (*Durio zibethinus*) for the manufacturing of charcoal briquettes as alternative fuel. 2023, 13(1), 76-87. <https://doi.org/10.29244/jpsl.13.1.76-87>
- Škorjanc, A., Jenček, R., Tratnik, A., & Knez, Ž. (2025). Advancing energy recovery: Evaluating torrefaction temperature effects on food waste properties from fruit and vegetable processing. *Processes*, 13(1), 208. <https://doi.org/10.3390/pr13010208>
- Sousa, L. M., Bresciani, L. P., & Silva, A. F. (2024). Biomass torrefaction for renewable energy: A comprehensive review. *Energy & Fuels*, 38(7), 11234–11249. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00451>
- Tuyen Boi Ly, Co Dang Phama, Kien A. Leb, Phung K. Lea. (2023). NoveNovel production methods of biochar from durian (*Durio zibethinus*) rind to be used as smokeless fuel. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 337-342. <https://doi.org/10.3303/CET23106057>
- Wannapeera, J., Fungtammasan, B., & Worasuwanarak, N. (2011). Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.010>
- Wang, C. H., Chen, H. W., & Lee, T. S. (2024). Performance of bioenergy production from durian shell wastes under different pyrolysis temperatures. *Water*, 16(18), 2688. <https://doi.org/10.3390/w16182688>
- Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., & Hills, C. (2018). The current status of biomass energy utilization in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2501–2512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.036>
- Zhang, S., Chen, X., Liu, L., & Guan, Y. (2020). Effect of torrefaction on fuel properties and energy yield of agricultural biomass. *Fuel*, 268, 117346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117346>
- Zhou, Q., Zhang, Y., Liu, H., & Wang, S. (2024). Progress in torrefaction pretreatment for biomass gasification. *Green Chemistry*, 26(5), 1992–2012. <https://doi.org/10.1039/d4gc00077f>