

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL
TERHADAP PROSES TOREFAKSI LIMBAH KAYU KARET
(*HEVEA BRASILIENSIS*)**

SKRIPSI

Disusun Oleh

KOMANG ANDRE WIJAYA

2115021020



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP PROSES TOREFAKSI LIMBAH KAYU KARET (*HEVEA BRASILIENSIS*)

Oleh

KOMANG ANDRE WIJAYA

Limbah kayu karet (*hevea brasiliensis*) merupakan salah satu jenis biomassa yang memiliki potensi besar sebagai sumber energi alternatif karena ketersediaannya yang melimpah dari kegiatan peremajaan tanaman karet di perkebunan, namun pemanfaatannya masih belum optimal. Limbah kayu karet (*hevea brasiliensis*) memiliki potensi besar sebagai bahan bakar padat karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, namun karakteristik awalnya masih memiliki kadar air dan zat volatil yang cukup tinggi sehingga memerlukan peningkatan kualitas melalui proses torefaksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C serta waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit terhadap karakteristik bahan bakar padat limbah kayu karet melalui pengujian nilai kalor, analisis proksimat, hidrofobisitas, *mass yield*, dan *energy yield*. Proses torefaksi dilakukan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket*, sementara pengujian nilai kalor menggunakan *oxygen bomb calorimeter* dan analisis proksimat dilakukan di laboratorium energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tinggal secara signifikan meningkatkan kualitas bahan bakar. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada temperatur 300°C selama 30 menit sebesar 5395,31 kkal/kg. Analisis proksimat pada 300°C menunjukkan penurunan kadar air dari 10,12% menjadi 6,04%, penurunan *volatile matter* dari 84,30% menjadi 78,31%, serta peningkatan *fixed carbon* dari 4,89% menjadi 14,07%. Selain itu, sifat hidrofobisitas meningkat, dengan penurunan penyerapan air hingga 4,82%. Dengan demikian, proses torefaksi efektif meningkatkan kualitas energi biomassa limbah kayu karet sebagai bahan bakar padat alternatif.

Kata kunci: torefaksi, kayu karet, nilai kalor, analisis proksimat, hidrofobisitas

ABSTRACT

EFFECT OF TEMPERATURE AND RESIDENCE TIME VARIATIONS ON THE TORREFACTION PROCESS OF RUBBER WOOD WASTE (*HEVEA BRASILIENSIS*)

By

KOMANG ANDRE WIJAYA

Rubber wood waste (*hevea brasiliensis*) is a type of biomass that has significant potential as an alternative energy source due to its abundant availability from rubber plantation replanting activities; however, its utilization remains limited. This biomass has the potential to be used as a solid fuel, but its initial characteristics include relatively high moisture and volatile matter contents, requiring an upgrading process through torrefaction. This study aims to analyze the effect of temperature variations of 250°C, 275°C, and 300°C and residence times of 10, 20, and 30 minutes on the characteristics of rubber wood waste solid fuel through calorific value testing, proximate analysis, hydrophobicity testing, mass yield, and energy yield. The torrefaction process was conducted using a tubular continuous torrefaction reactor with an oil jacket heating system, while the calorific value was measured using an oxygen bomb calorimeter and proximate analysis was performed in an energy laboratory. The results show that increasing temperature and residence time significantly improves the fuel quality. The highest calorific value was obtained at 300°C for 30 minutes, reaching 5395.31 kcal/kg. Proximate analysis at 300°C showed a decrease in moisture content from 10.12% to 6.04%, a decrease in volatile matter from 84.30% to 78.31%, and an increase in fixed carbon from 4.89% to 14.07%. In addition, hydrophobicity increased as indicated by a reduction in water absorption to 4.82%. Therefore, the torrefaction process effectively improves the energy quality of rubber wood waste biomass as an alternative solid fuel.

Keywords: torrefaction, rubber wood, calorific value, proximate analysis, hydrophobicity

Judul Skripsi

: **PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN
WAKTU TINGGAL TERHADAP PROSES
TOREFAKSI LIMBAH KAYU KARET (*HEVEA
BRASILIENSIS*)**

Nama Mahasiswa

: **Komang Andre Wijaya**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115021020**

Program Studi

: **S1 Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**



Pembimbing I

Pembimbing II

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

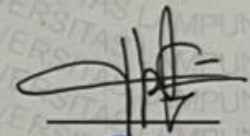
Ketua Penguji

: 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. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 Februari 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul **“Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tinggal Terhadap Proses Torefaksi Limbah Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*)”** 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, 26 Februari 2026

Yang Menyatakan,



Komang Andre Wijaya

NPM. 2115021020

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Mekar Asri, Kec. Sungkai Tengah, Kab. Lampung Utara, Provinsi Lampung pada tanggal 05 Juni 2004 sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Ketut Kembang dan Ibu Made Warsini. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN MEKAR ASRI hingga tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah pertama di SMP NEGERI 06 KOTABUMI yang diselesaikan tahun 2018 dan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 2 KOTABUMI yang diselesaikan tahun 2021.

Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama proses perkuliahan, penulis aktif tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Anggota Divisi Kaderisasi Periode 2022/2023 dan periode 2023/2024 serta aktif dalam UKM HINDU UNILA sebagai Anggota Bidang Seni dan Olahraga Periode 2022/2023. Penulis melakukan Kerja Praktek (KP) di PT. PLN NUSANTARA POWER UP SEBALANG dengan judul laporan **“ANALISIS EFEKTIVITAS *LOW PRESSURE HEATER (LPH)* TERHADAP VARIASI JUMLAH *TUBE* YANG DI *PLUG* DI PT PLN NUSANTARA POWER UP SEBALANG”**. Pada Februari Tahun 2026 penulis menyelesaikan studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi **“PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP PROSES TOREFAKSI LIMBAH KAYU KARET (*HEVEA BRASILIENSIS*)”** dibawah 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 penguji.

MOTTO

"Bangkitlah wahai manusia, kegagalan bukanlah takdirmu. Engkau telah dianugerahi intelegensia untuk menghindari kegagalan".

- Atharva Weda 8.1.6 -

"Don't be a loser mentality. Sebagai layaknya seorang pria sejati maka perjuangkan dan selesaikan semua yang sudah anda mulai".

- Komang Andre Wijaya -

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati serta rasa syukur yang mendalam, karya sederhana ini penulis persembahkan kepada:

Ida Sang Hyang Widhi Wasa

Atas segala anugerah, rahmat, serta tuntunan-Nya yang tiada henti menyertai setiap langkah perjalanan hidup penulis. Berkat kasih dan karunia-Nya, penulis diberikan kekuatan, kesabaran, serta kesempatan untuk melewati setiap proses, tantangan, dan pembelajaran hingga akhirnya mampu menyelesaikan karya ini.

Semoga segala usaha dan ilmu yang diperoleh dapat menjadi sesuatu yang bermanfaat dan diberkati oleh-Nya.

Ayahanda dan Ibunda Tercinta

Yang menjadi sumber kekuatan terbesar dalam hidup penulis. Terima kasih atas setiap doa yang tak pernah terputus, setiap pengorbanan yang tak pernah terhitung, serta kasih sayang tulus yang selalu mengiringi langkah penulis sejak awal hingga saat ini. Tanpa cinta, dukungan, serta kepercayaan yang diberikan, penulis tidak akan mampu berada pada titik ini. Karya kecil ini menjadi wujud bakti, rasa hormat, dan ungkapan terima kasih yang tak akan pernah cukup untuk membalas segala pengorbanan Ayahanda dan Ibunda.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin Angkatan 2021

Yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan akademik penulis. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, semangat, serta kenangan yang telah terukir

selama menempuh perjalanan perkuliahan. Setiap tawa, perjuangan, dan cerita yang telah kita lalui bersama akan selalu menjadi bagian berharga yang tidak akan terlupakan. Salam Solidarity Forever, Strong!!!

Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan manfaat, sekecil apa pun, bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta menjadi langkah awal bagi penulis untuk terus belajar, berkembang, dan memberikan kontribusi yang lebih baik di masa mendatang.

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Ida Sang Hyang Widhi Wasa atas segala rahmat, karunia, dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TINGGAL TERHADAP PROSES TOREFAKSI LIMBAH KAYU KARET (*HEVEA BRASILIENSIS*)”** dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa karya ini tidak akan dapat terselesaikan tanpa adanya bantuan, dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis berterimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ida Sang Hyang Widhi Wasa, karena rahmat-Nya, anugerah ilmu, kesempatan dan kesehatan dari-Nya, penulis mampu melaksanakan tugas akhir dan menyelesaikan skripsi ini hingga tuntas.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ahmad Suudi, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan banyak waktu untuk membimbing penulis hingga penulisan skripsi ini selesai.

6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang juga telah meluangkan banyak waktu dan banyak memberi masukan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat selesai sebagaimana mestinya.
7. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah berkenan untuk memberi koreksi dan masukan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat selesai sebagaimana mestinya.
8. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah banyak memberikan masukan terkait perkuliahan dari awal hingga akhir studi penulis.
9. Seluruh dosen , staff, dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, terimakasih atas segala ilmu yang telah diajarkan selama masa studi penulis.
10. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada Ayahanda tercinta Ketut Kembang dan Ibunda tercinta Made Warsini, yang selalu menjadi sumber kekuatan, semangat, serta inspirasi terbesar bagi penulis. Terima kasih atas segala doa yang tiada henti, kasih sayang yang tulus, serta pengorbanan yang tidak ternilai dalam mendukung setiap langkah penulis hingga mampu menyelesaikan pendidikan ini. Segala pencapaian yang diraih penulis hingga saat ini tidak terlepas dari dukungan, nasihat, dan kepercayaan yang selalu diberikan oleh Ayahanda dan Ibunda. Kalian selalu menjadi alasan atas segala langkah yang anak mu ini ambil dalam menentukan masa depan. Terimakasih banyak Pak, Bu.
11. Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada saudara yang darahnya juga ikut mengalir dalam raga ini, Wayan Indra dan Wayan Fitriani, terimakasih untuk kedua kakak saya yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, serta semangat kepada penulis dalam menjalani proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Kehadiran, perhatian, dan dorongan yang diberikan menjadi salah satu kekuatan bagi penulis untuk terus berusaha dan menyelesaikan setiap tanggung jawab akademik dengan sebaik-baiknya.
12. Kekasih tercinta, Nashrananda Marthayesha Lasudiana Putri yang selalu setia memberikan dukungan, semangat, serta perhatian selama masa studi penulis. Terima kasih atas segala bantuan, kesabaran, pengertian, dan motivasi yang

diberikan sehingga penulis dapat melewati berbagai tantangan dan menyelesaikan karya ini dengan baik.

13. Made Sudarme dan Wayan Dewi Kumala Sari, yang sudah penulis anggap seperti orang tua sendiri di perantauan selama masa studi penulis. terimakasih atas kebaikan, perhatian, serta bantuan yang telah diberikan selama penulis menjalani masa perkuliahan. Kehangatan, dukungan, dan kenyamanan yang diberikan selama penulis tinggal telah menjadi salah satu faktor yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi dengan baik.
14. Rekan seperjuangan Rams, Fathan, Ferta, Rega, dan Fauzan, terimakasih atas segala bantuan dan kerja sama selama proses tugas akhir ini sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ini sebagaimana mestinya.
15. Keluarga besar M21, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, semangat, serta kenangan yang telah terukir selama menempuh perjalanan perkuliahan. Setiap tawa, perjuangan, dan cerita yang telah kita lalui bersama akan selalu menjadi bagian berharga yang tidak akan terlupakan. Sukses selalu rekan-rekan M21.
16. Serta seluruh pihak yang hadir dalam setiap perjalanan penulis selama masa studi yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna serta masih terdapat berbagai keterbatasan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun sebagai bahan perbaikan dan penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Akhirnya, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat serta kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknik mesin dan energi berkelanjutan.

Bandar Lampung, 26 Februari 2026

Penulis,

Komang Andre Wijaya

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Biomassa	6
2.1.1 Jenis dan Contoh Pemanfaatan Biomassa	7
2.1.2 Konversi energi biomassa	8
2.2 <i>Hevea Brasiliensis</i>	10
2.3 Torefaksi	11
2.4 Parameter Proses Torefaksi	13
2.4.1 Temperatur	13
2.4.2 Tingkat Pemanasan dan <i>Residence Time</i>	14
2.4.3 Ukuran Sampel.....	14
2.4.4 Jenis Biomassa	14

2.5	Kualitas Produk Torefaksi	15
2.5.1	<i>Mass Yield</i>	15
2.5.2	<i>Energy Yield</i>	16
2.5.3	<i>Energy Density</i>	16
2.6	Karakteristik Bahan Bakar Padat	17
2.6.1.	Nilai Kalor.....	17
2.6.2.	Analisis Proksimat	18
2.6.3.	Analisis Ultimat	18
2.6.4.	Analisis Hidrofobisitas	19
2.7	<i>State Of The Art</i>	20
2.7.1	Temperatur	20
2.7.2	Waktu Tinggal	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		25
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2	Alat dan Bahan	25
3.3	Rancangan Penelitian	30
3.4	Prosedur Pengujian.....	30
3.4.1	Prosedur Pengujian Torefaksi.....	30
3.4.2	Prosedur Pengujian Nilai Kalor	32
3.4.3	Prosedur Pengujian Hidrofobisitas.....	34
3.5	Parameter Penelitian.....	35
3.6	Tahapan Penelitian.....	36
3.7	Alur Tahapan Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		40
4.1	Perubahan Visual Produk Hasil Torefaksi	40
4.2	Nilai Kalor	42

4.2.1	Nilai Kalor pada Temperatur 250°C	42
4.2.2	Nilai Kalor pada Temperatur 275°C	44
4.2.3	Nilai Kalor pada Temperatur 300°C	45
4.2.4	Analisis Gabungan	46
4.3	<i>Proximate Analysis</i>	48
4.4	Analisis Hidrofobisitas	50
4.5	Interaksi Sampel <i>Wood Chip</i> dengan Air.....	52
4.6	<i>Mass Yield</i>	55
4.6.1	<i>Mass Yield</i> pada Temperatur 250°C	56
4.6.2	<i>Mass Yield</i> pada Temperatur 275°C	57
4.6.3	<i>Mass Yield</i> pada Temperatur 300°C	58
4.7	<i>Energy Yield</i>	59
4.7.1	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 250°C	60
4.7.2	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 275°C	61
4.7.3	<i>Energy Yield</i> pada Temperatur 300°C	63
BAB V PENUTUP		65
5.1	Kesimpulan.....	65
5.2	Saran	66
DAFTAR PUSTAKA.....		68

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Alur konversi energi biomassa.	10
Gambar 2. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas <i>Oil Jacket</i>	25
Gambar 3. Instalasi Proses Pengujian Torefaksi (Apriyanto dkk., 2018).	27
Gambar 4. <i>Memory Logger</i>	28
Gambar 5. <i>Oxygen Bomb Calorimeter</i>	29
Gambar 6. Sampel <i>Wood Chip Hevea Brasiliensis</i>	29
Gambar 7. <i>Flowchart</i> Alur Penelitian.	39
Gambar 8. Visual Produk Hasil Torefaksi Kayu Karet (<i>Hevea Brasiliensis</i>).	40
Gambar 9. Perubahan Nilai Kalor pada Temperatur 250°C.	43
Gambar 10. Perubahan Nilai Kalor pada Temperatur 275°C.	44
Gambar 11. Perubahan Nilai Kalor pada Temperatur 300°C.	46
Gambar 12. Nilai Kalor pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit.	47
Gambar 13. Pengujian <i>Proximate</i> pada Sampel <i>Raw</i> dan 300°C.	48
Gambar 14. Persentase Penyerapan Air Selama Proses Pengujian Hidrofobisitas.	51
Gambar 15. Nilai <i>Mass Yield</i> pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit.	55
Gambar 16. Perbandingan <i>Mass Yield</i> pada Temperatur 250°C.	56
Gambar 17. Perbandingan <i>Mass Yield</i> pada Temperatur 275°C.	57
Gambar 18. Perbandingan <i>Mass Yield</i> pada Temperatur 300°C.	58
Gambar 19. Nilai <i>Energy Yield</i> pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit.	60

Gambar 20. Perbandingan <i>Energy Yield</i> pada Temperatur 250°C.	61
Gambar 21. Perbandingan <i>Energy Yield</i> pada Temperatur 275°C.	62
Gambar 22. Perbandingan <i>Energy Yield</i> pada Temperatur 300°C.	63

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.	26
Tabel 2. Komposisi Kimia <i>Wood Chip Hevea Brasiliensis</i>	29
Tabel 3. Rancangan Penelitian	30
Tabel 4. Uji interaksi sampel torefaksi dengan air	53

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu jenis biomassa yang memiliki potensi besar namun belum banyak dimanfaatkan adalah limbah kayu karet (*hevea brasiliensis*). Limbah ini berasal dari industri perkebunan karet yang tersebar luas di berbagai wilayah Indonesia yang berkontribusi sebagai penghasil karet alam sebesar 40% dari total perkebunan karet dunia (Bazenet dkk., 2021). Tanaman karet merupakan salah satu komoditas industri penting yang selama ini lebih difokuskan pada pemanfaatan getahnya sebagai bahan baku utama dalam industri karet. Sementara itu, bagian tanaman lainnya, seperti batang kayu karet yang sudah tidak produktif, seringkali diabaikan dan belum dimanfaatkan secara optimal. Pada perkebunan karet milik PTPN, tanaman karet umumnya memiliki siklus produktif sekitar 25 - 30 tahun, setelah itu pohon akan ditebang dan diremajakan karena penurunan produktivitas getah. Proses peremajaan ini menghasilkan limbah kayu karet dalam jumlah besar setiap siklusnya dan berpotensi untuk dikembangkan menjadi produk bernilai tambah, baik sebagai sumber energi alternatif maupun bahan baku produk lain seperti bahan bakar padat (Efiyanti dkk., 2020).

Torefaksi merupakan salah satu metode termokimia yang efektif untuk meningkatkan kualitas bahan bakar biomassa. Proses ini melibatkan pemanasan biomassa pada suhu antara 200°C hingga 300°C dalam kondisi terbatas oksigen, sehingga menghasilkan padatan berenergi tinggi dengan kadar air rendah, volatil yang lebih kecil, dan kandungan karbon tetap yang meningkat (Teh dkk., 2021). Pemilihan temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C

pada penelitian ini didasarkan pada rentang dekomposisi komponen utama biomassa, khususnya hemiselulosa yang mulai terurai signifikan pada temperatur sekitar 200°C - 260°C, sementara pada temperatur mendekati 300°C proses devolatilisasi berlangsung lebih intensif tanpa mencapai tahap karbonisasi penuh seperti pada proses pirolisis. Dengan demikian, variasi tersebut digunakan untuk mengamati pengaruh peningkatan intensitas reaksi termal terhadap perubahan sifat fisik dan kimia bahan bakar. Sementara itu, waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit dipilih untuk merepresentasikan durasi reaksi yang berbeda dalam mencapai kesetimbangan termal dan tingkat degradasi yang bervariasi (Basu, 2018). Biomassa hasil torefaksi juga memiliki sifat hidrofobik, yang memudahkan penyimpanan dan transportasi (Chen dkk., 2023).

Sejumlah penelitian telah sering dilakukan terhadap berbagai jenis biomassa seperti jerami padi, ampas tebu, serbuk gergaji, dan cangkang kelapa sawit. Hasilnya menunjukkan bahwa torefaksi mampu secara signifikan meningkatkan karakteristik energi dari biomassa tersebut (Karkach dkk., 2023). Secara komposisi, kayu karet diketahui mengandung komponen lignoselulosa yang cukup tinggi, menjadikannya kandidat yang baik sebagai bahan bakar padat. Namun, karakteristik awalnya yang masih mengandung kadar air dan zat volatil dalam jumlah besar menjadi kendala utama jika digunakan secara langsung sebagai bahan bakar. Oleh karena itu, diperlukan proses *pre-treatment* seperti torefaksi untuk meningkatkan kualitas jenis biomassa tersebut. Sayangnya, studi yang secara khusus meneliti torefaksi pada kayu karet masih sangat terbatas, baik dari segi kondisi proses maupun karakterisasi hasilnya, sehingga peluang penelitian di bidang ini masih terbuka lebar.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat celah penelitian mengenai pemanfaatan kayu karet sebagai bahan bakar alternatif melalui proses torefaksi. Minimnya kajian yang membahas perubahan sifat fisikokimia dan performa energi kayu karet setelah proses torefaksi menunjukkan perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian ini menjadi penting mengingat potensi limbah ini sangat besar

di Indonesia, serta peluangnya dalam mendukung diversifikasi energi dari limbah pertanian lokal (Novitasari dkk., 2024). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh proses torefaksi terhadap karakteristik kayu karet, meliputi perubahan nilai kalor, *proximate analysis*, *ultimate analysis* dan *hydrophobicity analysis*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan suhu dan kondisi torefaksi yang optimal untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas terbaik dari kayu karet. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi energi berbasis biomassa lokal, khususnya dalam pemanfaatan limbah pertanian seperti kayu karet. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi untuk pengelolaan limbah yang lebih produktif dan berkelanjutan, serta mendukung upaya pemerintah dalam mengembangkan energi baru dan terbarukan di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh proses torefaksi dengan variasi waktu tinggal (10, 20, dan 30 menit) pada temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C terhadap perubahan nilai kalor limbah kayu karet?
2. Bagaimana karakteristik bahan bakar padat hasil torefaksi kayu karet ditinjau dari *proximate analysis* dan *hydrophobicity analysis*?
3. Berapakah nilai *mass yield* dan *energy yield* yang terkandung dalam *wood chip hevea brasiliensis* sebagai bahan bakar padat?
4. Bagaimana sifat hidrofobitas produk hasil torefaksi limbah kayu karet sebagai bahan bakar padat?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian torefaksi kayu karet ini yaitu:

1. Untuk mengkaji pengaruh proses torefaksi dengan 3 variasi waktu tinggal yaitu 10, 20 dan 30 menit pada temperatur 250°C, 275°C dan 300°C terhadap perubahan nilai kalor limbah kayu karet.
2. Mengetahui karakteristik bahan bakar produk torefaksi berdasarkan hasil analisis proksimat (*proximate analysis*) yang meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon tetap.
3. Menentukan nilai *mass yield* dan *energy yield* yang terkandung dalam *wood chip hevea brasiliensis* sebagai bahan bakar padat produk torefaksi.
4. Mengetahui tingkat hidrofobisitas biomassa hasil torefaksi untuk mengevaluasi ketahanan bahan terhadap penyerapan air.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Biomassa yang digunakan dalam penelitian ini terbatas pada limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) berbentuk *wood chip* sebagai bahan baku.
2. Proses yang dikaji hanya mencakup torefaksi dalam rentang suhu 200°C hingga 300°C dengan waktu tinggal 10 – 30 menit pada kondisi minim oksigen.
3. Penelitian tidak mencakup analisis ekonomi, analisis skala industri, atau konversi lanjut dari hasil torefaksi seperti pirolisis atau pembakaran.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada tinjauan Pustaka berisikan landasan–landasan teori yang dijadikan acuan dan menunjang pada penelitian ini dan juga merupakan teori - teori dasar yang meliputi: penjelasan tentang biomassa, torefaksi,

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

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

V. SIMPULAN DAN SARAN

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

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik hasil proses fotosintesis. Sumber biomassa meliputi tanaman, limbah pertanian, limbah kehutanan, serta limbah organik dari kegiatan domestik maupun industri. Karena berasal dari sumber hayati yang dapat diperbaharui secara terus-menerus, biomassa dianggap sebagai alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil yang kian menipis dan bersifat tidak ramah lingkungan. Selain itu, biomassa juga dapat diolah menjadi berbagai bentuk energi seperti bahan bakar padat, cair, maupun gas (Basu, 2018).

Dalam pengembangan energi berbasis biomassa, proses konversi sangat penting untuk meningkatkan kualitas energi yang dihasilkan. Salah satu metode konversi yang banyak digunakan adalah konversi termokimia, seperti pembakaran langsung, pirolisis, gasifikasi, dan torefaksi. Proses-proses ini mengubah biomassa mentah menjadi bentuk energi yang lebih efisien dan bernilai tinggi. Khususnya, torefaksi telah dikenal mampu meningkatkan nilai kalor, mengurangi kadar air dan zat volatil, serta menghasilkan bahan bakar padat yang lebih stabil dan mudah disimpan (Karmaker dkk., 2021). Karakteristik kimia dan fisik dari biomassa sangat memengaruhi efisiensi dan hasil dari proses konversi tersebut. Biomassa umumnya tersusun atas beberapa komponen utama seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan ini menentukan tingkat reaktivitas termal, kemampuan pembakaran, serta kandungan energi dari biomassa. Oleh karena itu, sebelum digunakan sebagai bahan bakar, biomassa seringkali perlu melalui tahapan *pre-treatment* untuk

meningkatkan karakteristik energi dan efisiensi proses konversi.

Secara khusus, biomassa tergolong ke dalam bahan lignoselulosa yang tersusun atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa adalah polimer glukosa linear yang membentuk struktur utama dinding sel tanaman dan memiliki sifat kristalin tinggi, sehingga berperan besar dalam kandungan energi biomassa. Hemiselulosa merupakan polisakarida bercabang yang lebih amorf dan mudah terdegradasi pada suhu rendah, sementara lignin adalah senyawa aromatik kompleks yang memberikan kekakuan dan ketahanan struktural pada tanaman. Komposisi ketiga komponen ini sangat menentukan sifat termal biomassa, seperti titik nyala, kadar volatil, kadar karbon tetap, dan nilai kalor. Selain itu, kandungan air, abu, dan unsur mineral juga memengaruhi performa biomassa saat dikonversi menjadi bahan bakar. Oleh karena itu, pemahaman terhadap struktur kimia dan sifat fisik biomassa sangat penting dalam menentukan perlakuan termal yang tepat agar menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas tinggi dan efisiensi energi yang optimal (Nawawi dkk., 2018).

2.1.1 Jenis dan Contoh Pemanfaatan Biomassa

Biomassa memiliki berbagai bentuk dan sumber, yang masing-masing dapat dimanfaatkan sebagai alternatif energi terbarukan. Penggunaan biomassa telah banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari dan sektor industri, menjadikannya sumber energi yang fleksibel dan berkelanjutan. Berdasarkan studi (Khairiah dkk., 2024) ada beberapa jenis biomassa yang banyak digunakan antara lain:

a. Limbah organik manusia dan hewan

Salah satu jenis biomassa yang banyak digunakan adalah limbah organik dari manusia dan hewan. Limbah ini dapat diolah melalui proses fermentasi anaerob menjadi biogas, yang terdiri dari metana dan karbon dioksida. Biogas ini kerap digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk kebutuhan rumah tangga, terutama di daerah pedesaan atau wilayah yang dekat dengan pusat pertanian dan

peternakan. Selain menyediakan energi, pemanfaatan kotoran juga membantu mengurangi pencemaran lingkungan.

b. Tanaman energi

Contoh lainnya adalah tanaman energi, yaitu tanaman yang secara khusus dibudidayakan untuk tujuan produksi bahan bakar. Beberapa jenis tanaman seperti jagung, jerami, gandum, dan kedelai telah dikembangkan secara komersial untuk menghasilkan biofuel seperti etanol, biodiesel, butanol, dan propanol. Tanaman ini ditanam dalam skala besar karena memiliki kandungan zat yang mudah dikonversi menjadi energi cair, yang kemudian dapat digunakan untuk transportasi maupun pembangkit listrik.

c. Limbah pertanian

Limbah pertanian seperti jerami dan ampas tebu juga termasuk biomassa yang berpotensi tinggi. Melalui proses fermentasi, limbah ini dapat menghasilkan biogas yang bisa digunakan sebagai bahan bakar untuk memasak atau menghasilkan listrik. Di samping itu, residu hasil proses fermentasi dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik, sehingga proses ini mendukung sistem pertanian terpadu dan ramah lingkungan.

d. Kayu

Sejak zaman dahulu, kayu telah menjadi bahan bakar utama bagi manusia. Hingga saat ini, kayu masih digunakan untuk memasak, pemanas rumah, dan bahkan sebagai bahan bakar dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap. Karena dapat diperbarui melalui kegiatan kehutanan berkelanjutan, kayu termasuk salah satu biomassa yang paling stabil dan mudah diakses.

2.1.2 Konversi energi biomassa

Energi biomassa dapat dimanfaatkan melalui berbagai jalur konversi untuk menghasilkan energi yang dapat digunakan dalam bentuk padat, cair, maupun gas. Proses konversi ini bertujuan untuk meningkatkan nilai guna dari biomassa mentah menjadi energi yang lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan penggunaan. Secara umum, metode konversi

biomassa terbagi menjadi tiga kategori utama menurut studi (Khairiah dkk., 2024) yaitu:

a. Konversi Termokimia

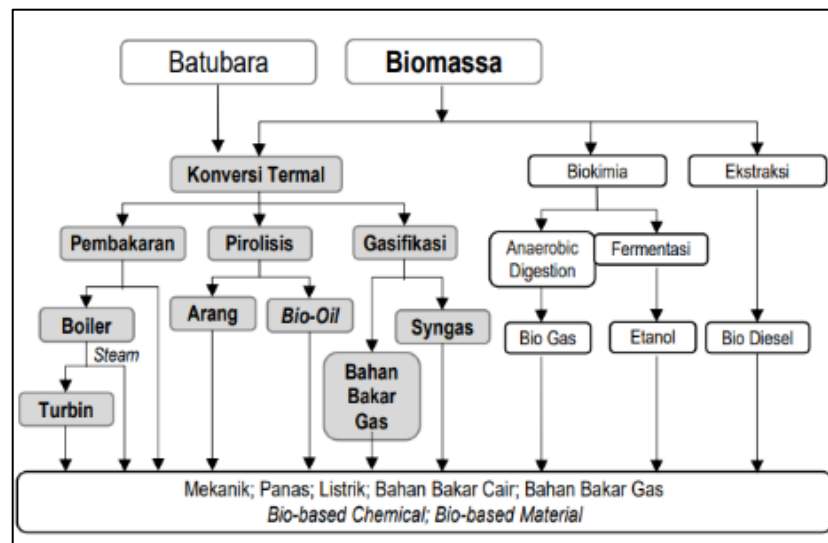
Konversi termokimia adalah metode yang paling umum digunakan, terutama untuk biomassa lignoselulosa seperti kayu, jerami, atau cangkang buah. Metode ini melibatkan proses-proses seperti pembakaran langsung (*combustion*), pirolisis, gasifikasi, dan torefaksi. Masing-masing proses memiliki karakteristik dan hasil produk yang berbeda. Pembakaran menghasilkan energi panas secara langsung, sedangkan pirolisis dan gasifikasi mengubah biomassa menjadi gas (*syngas*), tar, atau arang. Sementara Torefaksi adalah proses pemanasan ringan biomassa dalam kondisi minim oksigen pada suhu 200°C - 300°C untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan kandungan air dan volatilitas yang rendah, serta nilai kalor yang lebih tinggi.

b. Konversi Biokimia

Konversi biokimia memanfaatkan mikroorganisme atau enzim untuk menguraikan biomassa menjadi energi. Proses yang termasuk dalam kategori ini antara lain fermentasi dan digesti anaerob. Fermentasi digunakan untuk menghasilkan bioetanol dari bahan-bahan kaya gula atau pati seperti jagung dan singkong. Sementara itu, digesti anaerob mengubah limbah organik seperti kotoran hewan menjadi biogas (campuran metana dan karbon dioksida), yang dapat digunakan untuk bahan bakar kompor, generator listrik, maupun pemanas air.

c. Konversi mekanis

Konversi mekanis merupakan proses fisik seperti pengepresan minyak dari tanaman penghasil minyak seperti kelapa sawit atau jarak pagar, yang kemudian dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar atau diubah menjadi biodiesel melalui proses transesterifikasi. Meskipun sederhana, proses ini membutuhkan pengolahan tambahan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar yang dihasilkan. Alur konversi energi biomassa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur konversi energi biomassa (Udjianto dkk., 2021).

2.2 *Hevea Brasiliensis*

Tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis di Indonesia yang selama ini dimanfaatkan terutama untuk produksi lateks sebagai bahan baku industri karet. Namun, setelah siklus produksi lateks menurun, batang kayu karet hasil peremajaan perkebunan biasanya hanya dianggap sebagai limbah dengan nilai ekonomi rendah. Padahal, kayu karet memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, terdiri dari selulosa sekitar 43% - 47%, hemiselulosa 18% -23%, serta lignin 20% - 25%, yang menjadikannya sumber energi potensial apabila diolah menjadi bahan bakar padat. (Efiyanti dkk, 2020) menekankan bahwa potensi kayu karet di Indonesia sangat besar mengingat luasnya areal perkebunan karet yang tersebar di Sumatera dan Kalimantan. Akan tetapi, karakteristik awal kayu karet masih menyimpan kelemahan seperti kadar air yang tinggi (30% - 60%) serta kandungan zat volatil yang cukup besar, sehingga penggunaannya secara langsung sebagai bahan bakar kurang efisien dan tidak stabil. Kondisi inilah yang membuat kayu karet memerlukan perlakuan awal berupa proses *pre-treatment* termal seperti torefaksi agar kualitas energi yang dihasilkan meningkat.

Melalui proses torefaksi, kayu karet dapat ditingkatkan kualitasnya menjadi bahan bakar padat dengan densitas energi yang lebih tinggi, stabilitas penyimpanan yang lebih baik, serta sifat hidrofobisitas yang lebih kuat. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa torefaksi mampu menurunkan kadar air dan zat volatil kayu karet secara signifikan, sekaligus meningkatkan fraksi karbon tetap yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai kalor. Dengan menurunkan rasio O/C dan H/C melalui proses dekomposisi hemiselulosa dan sebagian selulosa, produk torefaksi kayu karet menjadi lebih mendekati karakteristik batubara muda sehingga dapat digunakan sebagai energi alternatif terbarukan. Sayangnya, kajian ilmiah mengenai torefaksi kayu karet masih relatif terbatas, terutama terkait kondisi operasional seperti variasi temperatur, waktu tinggal, maupun pengaruh ukuran sampel. Hal ini membuka peluang penelitian lebih lanjut, khususnya mengenai performa kayu karet sebagai bahan bakar padat hasil torefaksi, sehingga dapat diketahui efektivitas dan karakterisasi energi dari kedua jenis biomassa tersebut.

2.3 Torefaksi

Torefaksi merupakan suatu proses perlakuan termal yang digunakan untuk meningkatkan kualitas biomassa mentah menjadi bahan bakar yang memiliki performa lebih baik. Proses ini berlangsung pada suhu antara 200°C - 300°C, selama 30 - 120 menit, di lingkungan yang bebas oksigen (*inert*) dengan tekanan atmosferik (Sulistio dkk., 2020). Selama proses torefaksi, struktur biomassa mengalami perubahan fisik yang menyebabkan material menjadi lebih rapuh dan mengalami penurunan kekuatan mekanik. Hal ini berdampak positif pada kemudahan proses penggilingan atau penghancuran, yang biasanya menjadi kendala pada biomassa dalam bentuk mentah (Apriyanto, 2020).

Komponen utama biomassa seperti hemiselulosa, selulosa, dan lignin mengalami degradasi termal selama proses torefaksi. Hemiselulosa merupakan komponen yang paling tidak stabil secara termal dan mulai terdegradasi pada suhu sekitar 180°C hingga 260°C, menghasilkan gas seperti CO₂ dan senyawa

asam organik (Tumuluru dkk., 2011). Selulosa dan lignin juga mengalami perubahan, namun dalam tingkat yang lebih lambat dibanding hemiselulosa (Basu, 2018). Reaksi utama yang terjadi meliputi devolatilisasi (pelepasan senyawa volatil), depolimerisasi (pemutusan rantai polimer), dan karbonisasi parsial (Tumuluru dkk., 2011). Proses-proses ini menyebabkan peningkatan kandungan karbon dan pengurangan kandungan hidrogen dan oksigen dalam struktur biomassa (Wenasa dan Hardianto, 2021).

Secara umum, torefaksi dibagi dalam tiga tahapan berdasarkan temperatur diantaranya yaitu tahap pengeringan (*drying*), tahap pra-torefaksi (*pre-torrefaction*), dan tahap torefaksi aktif (*active torrefaction*). Pada tahap pertama, suhu meningkat hingga sekitar 150°C dan hanya terjadi penguapan air bebas (Basu, 2018). Tahap kedua berlangsung pada suhu 150–200°C, ditandai dengan pelepasan CO₂ akibat reaksi dehidrasi kimiawi internal. Tahap ketiga, yang merupakan inti dari proses torefaksi, terjadi antara 200–300°C dan menghasilkan perubahan besar dalam struktur hemiselulosa dan pelepasan senyawa volatil (Tumuluru dkk., 2011). Pada suhu melebihi 280°C, proses menjadi eksotermis dan mendekati pirolisis penuh, sehingga batas atas suhu torefaksi biasanya dijaga di bawah 300°C (Basu, 2018).

Produk padat hasil torefaksi memiliki warna coklat tua hingga hitam, serta massa yang lebih ringan akibat hilangnya kandungan volatil. Meski massa berkurang hingga sekitar 30%, sekitar 90% kandungan energi awal tetap tersimpan dalam bentuk padatan. Nilai kalor biomassa meningkat sebesar 15–25% dan kadar air turun drastis hingga kurang dari 3% (berat basah) (Tumuluru dkk., 2011). Rasio oksigen terhadap karbon (O/C) dan hidrogen terhadap karbon (H/C) juga berkurang, membuat karakteristik kimianya lebih mendekati batubara peringkat rendah seperti lignit atau sub-bituminus C (Wenasa dan Hardianto, 2021).

Selain peningkatan nilai kalor, torefaksi memberikan sejumlah manfaat pada sifat fisik biomassa. Biomassa yang telah ditorefaksi menjadi lebih rapuh, lebih mudah digiling, dan menunjukkan distribusi ukuran partikel yang lebih

seragam. Kehilangan gugus hidroksil (OH) membuat biomassa menjadi hidrofobik, yaitu tidak mudah menyerap air dari lingkungan (Tumuluru dkk., 2011). Stabilitas kimia juga meningkat, menjadikan produk lebih tahan terhadap oksidasi dan degradasi mikroba saat penyimpanan. Oleh karena itu, torefaksi sangat sesuai untuk aplikasi *co-firing* dengan batubara serta sebagai bahan baku unggulan dalam proses gasifikasi dan pirolisis lanjutan (Basu, 2018).

2.4 Parameter Proses Torefaksi

Torefaksi merupakan proses termal yang kompleks dan sangat bergantung pada sejumlah parameter proses. Efektivitas dan hasil akhir dari proses ini ditentukan oleh kondisi operasional yang mencakup temperatur, laju pemanasan, waktu tinggal (*residence time*), ukuran partikel, dan juga jenis biomassa yang digunakan. Setiap parameter memiliki pengaruh langsung terhadap sifat fisik dan kimia biomassa yang dihasilkan, diantaranya adalah massa, kadar volatil, nilai kalor, dan sifat pembakaran. Menurut (Basu, 2018) terdapat beberapa parameter penting dalam proses torefaksi biomassa, diantaranya sebagai berikut.

2.4.1 Temperatur

Temperatur adalah parameter terpenting dalam torefaksi karena menentukan tingkat dekomposisi termal dari komponen lignoselulosa. Proses torefaksi umumnya dilakukan dalam kisaran 200°C - 300°C, di bawah 200°C hanya terjadi pengeringan, sedangkan di atas 300°C biomassa cenderung memasuki tahap pirolisis. Pada temperatur antara 240°C - 270°C, hemiselulosa mengalami degradasi signifikan, menyebabkan pelepasan senyawa volatil dan peningkatan kandungan karbon dalam biomassa padat. Nilai kalor biomassa meningkat seiring dengan naiknya temperatur, tetapi pada suhu terlalu tinggi, kehilangan massa menjadi terlalu besar, menurunkan *energy yield*. Oleh karena itu, suhu optimal biasanya dipilih antara 240°C - 270°C tergantung tujuan aplikasi.

2.4.2 Tingkat Pemanasan dan *Residence Time*

Laju pemanasan (*heating rate*) dan waktu tinggal (*residence time*) juga sangat memengaruhi hasil torefaksi. Pemanasan yang terlalu cepat dapat menyebabkan pelepasan senyawa volatil yang tidak merata, sedangkan pemanasan lambat cenderung meningkatkan efisiensi konversi energi. Untuk sebagian besar studi eksperimental, laju pemanasan yang digunakan berada pada kisaran 10°C - 50°C per menit. Sementara itu, waktu tinggal dalam zona pemanasan utama biasanya berkisar antara 10 - 60 menit. Waktu yang lebih lama memungkinkan konversi lebih lengkap, tetapi juga dapat menurunkan *mass yield*. Oleh karena itu, kombinasi optimal antara laju pemanasan dan waktu tinggal perlu ditentukan secara spesifik sesuai jenis biomassa dan desain reaktor.

2.4.3 Ukuran Sampel

Ukuran partikel biomassa yang digunakan dalam torefaksi memiliki pengaruh signifikan terhadap transfer panas dan difusi produk gas keluar dari partikel. Partikel yang lebih kecil memungkinkan panas lebih cepat meresap ke seluruh volume partikel, mempercepat proses torefaksi dan menghasilkan produk yang lebih seragam. Namun, ukuran yang terlalu kecil juga dapat meningkatkan kehilangan massa akibat volatil yang keluar terlalu cepat. Sebaliknya, partikel besar membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai suhu inti, sehingga risiko terjadinya torefaksi tidak merata menjadi lebih besar. Ukuran optimum partikel umumnya berada pada kisaran 2 mm - 50 mm tergantung konfigurasi reaktor dan metode pemanasan.

2.4.4 Jenis Biomassa

Setiap jenis biomassa memiliki komposisi kimia yang berbeda, seperti kadar hemiselulosa, selulosa, dan lignin, yang memengaruhi respons termalnya terhadap torefaksi. Biomassa lunak (*softwood*) seperti pinus memiliki kandungan lignin tinggi dan lebih tahan terhadap degradasi termal, sedangkan biomassa keras (*hardwood*) atau limbah pertanian lebih cepat terdegradasi karena kandungan hemiselulosa yang tinggi.

Oleh karena itu, biomassa yang berbeda akan membutuhkan suhu dan waktu proses yang disesuaikan. Selain itu, kandungan abu dan kelembaban awal juga memengaruhi efisiensi pemanasan dan kualitas produk akhir. Penyesuaian parameter proses berdasarkan jenis biomassa sangat penting untuk memperoleh hasil torefaksi optimal secara teknis dan ekonomis.

2.5 Kualitas Produk Torefaksi

Kualitas produk torefaksi umumnya ditinjau dari tiga parameter utama, yaitu *mass yield*, *energy yield*, dan *energy density*. Ketiga parameter ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana biomassa mengalami perubahan fisik dan kimia selama proses torefaksi, serta seberapa besar nilai energi yang dipertahankan atau meningkat setelah perlakuan. Evaluasi ini penting karena torefaksi bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas lebih baik dibandingkan biomassa mentah, baik dari sisi nilai kalor, kestabilan penyimpanan, maupun sifat pembakaran.

2.5.1 *Mass Yield*

Mass yield pada dasarnya menunjukkan berapa banyak padatan yang masih tersisa setelah biomassa mengalami proses torefaksi, yakni perbandingan antara massa awal dengan massa akhir produk. Karena torefaksi memicu perubahan pada kandungan hidrokarbon dalam biomassa, maka rasio massa yang tersisa seringkali belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi proses yang sesungguhnya. Oleh karena itu, perhitungan *mass yield* biasanya dilakukan pada beberapa dasar perhitungan berbeda. Pada kondisi “*dry ash free*” (daf), yang dihitung hanya fraksi organik biomassa tanpa memperhitungkan abu, sehingga memberikan gambaran konversi murni dari bahan organik menjadi arang. Sementara itu, pada kondisi “*dry base*” (db), abu tetap dimasukkan dalam perhitungan sehingga lebih sesuai untuk biomassa dengan kandungan anorganik cukup tinggi. Selain kedua pendekatan tersebut, ada pula

kondisi “*as-received*” (ar) yang memperhitungkan keseluruhan material sebagaimana diterima, termasuk kadar air dan abu, sehingga mencerminkan sifat biomassa secara menyeluruh. Mass Yield dapat dihitung dengan Persamaan 1 (Basu, 2018).

$$MY = \frac{m_{toref}}{m_{raw}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

MY : *Mass yield* (%)

m_{toref} : Massa total biomassa setelah ditorefaksi (Kg)

m_{raw} : Massa total biomassa mentah sebelum ditorefaksi (Kg)

2.5.2 *Energy Yield*

Energy yield menunjukkan seberapa besar energi dari biomassa awal yang masih tersisa dalam padatan setelah melalui proses torefaksi. Dengan kata lain, EY adalah perbandingan antara jumlah energi yang terkandung dalam produk hasil torefaksi dengan jumlah energi yang dimiliki bahan sebelum proses torefaksi dan dapat dihitung dengan Persamaan 2 (Basu, 2018).

$$EY = MY \times \frac{HHV_t}{HHV_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

EY : *Energy Yield* (%)

MY : *Mass yield* (%)

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

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

2.5.3 *Energy Density*

Energy density merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kualitas produk hasil torefaksi. Parameter ini menunjukkan berapa

banyak energi yang dapat dilepaskan ketika satu satuan massa biomassa yang sudah ditorefaksi dibakar hingga tuntas, kemudian hasil pembakarannya didinginkan. Konsep ini sangat erat kaitannya dengan istilah energi spesifik, nilai kalor, maupun nilai pemanasan. Dengan kata lain, *energy density* menggambarkan jumlah energi bersih yang tersedia dari biomassa tertorefaksi per satuan massanya, yang pada dasarnya sepadan dengan nilai kalor bawah (*Lower Heating Value* atau LHV).

2.6 Karakteristik Bahan Bakar Padat

Karakteristik bahan bakar padat menjadi hal penting yang perlu dianalisis untuk menilai sejauh mana kualitas biomassa hasil torefaksi dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Dalam konteks penelitian ini, yaitu pemanfaatan kayu karet, proses torefaksi diharapkan mampu meningkatkan mutu bahan bakar baik dari sisi nilai energi, kestabilan termal, maupun efisiensi pembakaran. Tiga parameter utama yang biasa digunakan untuk menilai karakteristik bahan bakar padat adalah nilai kalor, hasil analisis proksimat, dan hasil analisis ultimate. Ketiga parameter ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi energi, stabilitas kimia, dan tingkat keberhasilan proses torefaksi dalam memperbaiki sifat awal biomassa.

2.6.1. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan indikator utama tentang seberapa besar energi yang bisa dihasilkan saat suatu bahan dibakar. Torefaksi terbukti mampu meningkatkan nilai kalor dengan cara mengurangi kadar air dan senyawa volatil, serta memperkaya kandungan karbon tetap dalam biomassa. (Basu, 2018) menjelaskan bahwa peningkatan nilai kalor berkaitan erat dengan naiknya kadar karbon dan turunnya kadar oksigen. Rasio O/C dan H/C menjadi lebih kecil, menandakan bahwa struktur kimia biomassa mendekati karakteristik batubara muda. Penelitian oleh (Wahyudi dkk., 2020) menunjukkan bahwa nilai kalor biomassa seperti tandan kosong kelapa sawit bisa meningkat dari 16.357 kJ/kg (kondisi mentah) menjadi

21.083 kJ/kg setelah torefaksi pada suhu 275°C. Dengan mempertimbangkan bahwa kayu karet memiliki kandungan lignin dan karbon yang relatif tinggi, maka proses torefaksi pada bahan ini diperkirakan akan memberikan hasil yang bahkan lebih signifikan.

2.6.2. Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui empat komponen penting dalam biomassa, yaitu kadar air, kadar zat terbang, abu, dan karbon tetap. Setelah torefaksi, biomassa umumnya mengalami penurunan kadar air dan zat terbang, namun mengalami peningkatan karbon tetap. Menurut (Basu, 2018), penurunan kadar zat terbang dan air sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap kestabilan pembakaran dan penyimpanan bahan bakar. Dalam studi (Wahyudi dkk., 2020), kadar air TKKS yang semula 11,63% menurun menjadi hanya 4,31% setelah torefaksi. Di sisi lain, kadar karbon tetap naik dari 10,80% menjadi 20,70%, sedangkan zat terbang menurun dari 73,57% menjadi 61,40%. Penurunan kandungan volatil menunjukkan bahwa biomassa hasil torefaksi menjadi lebih stabil secara termal dan memiliki potensi emisi yang lebih rendah saat dibakar. Kayu karet yang telah melalui proses serupa diperkirakan akan menunjukkan tren serupa, bahkan mungkin lebih baik karena tekstur dan komposisi awalnya yang padat dan kaya lignin.

2.6.3. Analisis Ultimat

Analisis ultimat bertujuan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur dasar dalam biomassa seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Unsur karbon sangat berperan dalam pembentukan energi saat pembakaran, sementara oksigen dan hidrogen cenderung membentuk uap atau senyawa volatil lain yang menurunkan efisiensi energi. Setelah melalui proses torefaksi, kandungan karbon meningkat, sedangkan kandungan oksigen dan hidrogen menurun. (Basu, 2018) menyebutkan bahwa penurunan kadar oksigen merupakan indikator bahwa struktur kimia biomassa telah bertransformasi

mendekati struktur batubara. Pada penelitian (Wahyudi dkk., 2020), kandungan karbon dalam TKKS meningkat dari 42,93% menjadi 53,95%, sedangkan oksigen turun dari 49,35% menjadi 39,83%. Rasio O/C yang lebih rendah menjadikan bahan bakar lebih tahan terhadap kelembapan dan memiliki sifat hidrofobik. Meskipun kandungan nitrogen dan sulfur dalam biomassa umumnya rendah, keduanya tetap perlu diperhatikan karena dapat memicu pembentukan NO_x dan SO_x saat pembakaran tertutup.

2.6.4. Analisis Hidrofobisitas

Biomassa pada kondisi awal umumnya bersifat higroskopis, yaitu mudah menyerap kelembapan dari lingkungan, sehingga kurang stabil apabila digunakan sebagai bahan bakar padat. Menurut (Basu, 2018), proses torefaksi mampu meningkatkan sifat hidrofobisitas biomassa dengan mengurangi kemampuan material tersebut dalam menyerap air. Peningkatan sifat hidrofobik ini terutama disebabkan oleh dekomposisi hemiselulosa, yang merupakan komponen lignoselulosa paling reaktif terhadap panas dan memiliki banyak gugus hidroksil yang berperan dalam pengikatan air. Selama proses torefaksi, gugus hidroksil tersebut mengalami kerusakan akibat reaksi termal, sehingga kemampuan biomassa untuk membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air menurun secara signifikan. Selain itu, torefaksi juga menyebabkan terbentuknya struktur kimia yang lebih nonpolar dan peningkatan kandungan lignin relatif, yang secara alami bersifat lebih tahan terhadap air. Akibat perubahan struktur dan komposisi ini, biomassa hasil torefaksi menjadi lebih stabil terhadap kelembapan lingkungan dan tidak mudah mengalami peningkatan kadar air selama penyimpanan. Dengan demikian, peningkatan hidrofobisitas merupakan salah satu keunggulan utama biomassa hasil torefaksi yang menjadikannya lebih layak digunakan sebagai bahan bakar padat, dengan karakteristik penyimpanan yang mendekati batubara. Hidrofobisitas dinilai berdasarkan kemampuan biomassa menyerap air (*water uptake* atau *moisture absorption*) setelah

perendaman atau penyimpanan pada kondisi lembab. Semakin kecil penyerapan airnya, maka biomassa tersebut semakin hidrofobik. Persentase penyerapan air dari biomassa dapat dihitung dengan Persamaan 3 (Basu, 2018).

$$WU = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- WU : *Water uptake* atau penyeyrapan air (%)
 W₁ : Massa sampel kering sebelum perendaman (g)
 W₂ : Massa sampel setelah perendaman (g)

2.7 State Of The Art

Berbagai studi menunjukkan bahwa temperatur, waktu tinggal, dan ukuran sampel selama proses torefaksi memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik fisik dan kimia biomassa. Faktor-faktor ini berkontribusi langsung terhadap kualitas bioenergi yang dihasilkan, baik dari segi nilai kalor, kandungan proksimat dan ultimat, hingga sifat hidrofobitasnya. Berikut ini merupakan rangkuman pengaruh dari ketiga parameter tersebut berdasarkan hasil-hasil penelitian terkini.

2.7.1 Temperatur

a. Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Kalor

Peningkatan temperatur torefaksi diketahui berkorelasi positif dengan peningkatan nilai kalor biomassa. (Hidayat dkk., 2020) menggunakan *reaktor Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) untuk menorefaksi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) pada suhu 280°C selama 4 menit, menghasilkan nilai kalor sebesar 17,90 MJ/kg. Nilai ini hampir setara dengan torefaksi oksidatif berdurasi lebih lama yang mencapai 18,28 MJ/kg. Sementara itu, (Rani dkk., 2020) juga melaporkan peningkatan nilai kalor dari 15,82 MJ/kg menjadi 18,28

MJ/kg setelah torefaksi suhu 280°C selama 20 menit. Hal ini terjadi akibat terdegradasinya hemiselulosa dan selulosa menjadi senyawa volatil, sehingga proporsi karbon tetap meningkat.

b. Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Proksimat

Peningkatan temperatur berdampak langsung pada kandungan proksimat biomassa, terutama terhadap kadar air, abu, zat volatil, dan karbon tetap. (Fernando dan Helwani, 2016) menunjukkan bahwa kadar air pada TKKS menurun dari 11,5% menjadi 5 - 8,5% setelah torefaksi pada 225 - 275°C. Abu meningkat dari 1,45% menjadi 3,41%, dan kandungan karbon tetap naik dari 17,6% hingga mencapai 44,31%. (Rani dkk., 2020) melaporkan bahwa kadar air pada pelet yang ditorefaksi selama 20 menit pada suhu 280°C hampir mencapai 0%, dan kadar abu meningkat dari 0,4% menjadi 1,05%. Zat volatil yang semula 84,10% turun menjadi 40,41% setelah torefaksi pada 300°C selama 60 menit. Penurunan volatil ini sejalan dengan peningkatan karbon tetap yang menandakan terjadinya proses devolatilisasi.

c. Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Ultimat

Temperatur torefaksi mempengaruhi komposisi ultimat biomassa, yakni unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). (Mangalla dkk., 2023) mencatat bahwa pada pelet kayu jati, kadar C meningkat dari 48,4% menjadi 64,1% setelah torefaksi pada 300°C selama 20 menit. Kandungan H menurun dari 6,69% menjadi 4,05%, dan kadar O turun dari 44,3% menjadi 30,6%. Ini menunjukkan berlangsungnya dehidrasi dan dekarboksilasi. Kandungan N bervariasi antara 0,14% dan 0,21%, sedangkan S tetap rendah (0,019 - 0,032%), menunjukkan bahwa kedua unsur tersebut tidak terlalu dipengaruhi oleh temperatur.

d. Pengaruh Temperatur Terhadap Hidrofobisitas

Studi (Hidayat dkk., 2020) melaporkan bahwa hidrofobisitas meningkat signifikan pada suhu 240–300°C akibat degradasi gugus hidroksil dari hemiselulosa dan selulosa. Lignin yang bersifat hidrofobik menjadi dominan, dan pada temperatur tinggi, lignin melunak lalu mengeras saat pendinginan, membentuk lapisan pelindung pada permukaan pellet. Ini menjadikan pellet hasil torefaksi lebih tahan terhadap kelembapan dan degradasi biologis.

2.7.2 Waktu Tinggal

a. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Nilai Kalor

Waktu tinggal atau durasi proses torefaksi merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi peningkatan kualitas energi biomassa. Semakin lama waktu tinggal, biomassa memiliki waktu yang lebih cukup untuk mengalami reaksi termal seperti penguapan air dan pelepasan sebagian senyawa volatil, sehingga energi dalam biomassa menjadi lebih terkonsentrasi. Penelitian yang dilakukan (Prayitno dkk., 2024) menunjukkan bahwa proses torefaksi pada limbah buah hutan tropis seperti kulit kopi, kulit kakao, dan kulit manggis pada temperatur 250–300°C mampu meningkatkan nilai kalor biomassa secara signifikan. Pada temperatur 275°C, nilai kalor produk torefaksi kulit kopi dan kulit kakao masing-masing mencapai 6519,28 cal/g dan 6661,58 cal/g, sedangkan pada temperatur 300°C nilai kalor tertinggi pada kulit manggis mencapai 6875,6 cal/g. Nilai tersebut bahkan telah melampaui rentang nilai kalor batubara sub-bituminous A yang berada pada kisaran 5827–6377 cal/g. Peningkatan nilai kalor ini terjadi karena selama proses torefaksi sebagian komponen biomassa mengalami dekomposisi sehingga massa biomassa berkurang, namun densitas energinya meningkat. Dengan demikian, waktu tinggal yang cukup selama proses torefaksi memberikan kesempatan bagi reaksi termal berlangsung lebih optimal sehingga kualitas bahan bakar padat yang dihasilkan menjadi lebih baik.

b. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Nilai Proksimat

Dalam konteks proksimat, waktu tinggal yang lebih lama selama proses torefaksi memungkinkan terjadinya dekomposisi yang lebih lengkap terhadap fraksi-fraksi organik yang tidak stabil. (Rani dkk., 2020) melaporkan bahwa pada pelet TKKS yang ditorefaksi selama 30 menit pada 300°C, kadar karbon tetap meningkat dari 10,03% menjadi 14,23%. Di saat yang sama, kadar abu meningkat dari 0,4% menjadi 1,05%, sedangkan zat volatil menurun tajam dari 84,10% menjadi 40,41%. Kadar air juga hampir mendekati 0% setelah 30 menit perlakuan. Data ini menunjukkan bahwa waktu tinggal yang lebih lama memberikan cukup waktu untuk proses evaporasi air dan penguraian senyawa volatil, menghasilkan biomassa yang lebih stabil secara termal dan kaya akan fraksi padat yang bernilai energi tinggi.

c. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Nilai Ultimat

Waktu tinggal tidak hanya memengaruhi komponen proksimat, tetapi juga membawa dampak terhadap nilai ultimat biomassa. (Mangalla dkk., 2023) melaporkan bahwa torefaksi pelet kayu jati selama 20 menit dengan metode *microwave* menyebabkan peningkatan kadar karbon hingga 64,1% serta penurunan signifikan pada kadar oksigen dan hidrogen. Penurunan kadar H dari 6,69% menjadi 4,05% dan kadar O dari 44,3% menjadi 30,6% menunjukkan bahwa proses pemanasan selama waktu yang cukup mampu memicu reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi. Sementara kandungan nitrogen dan sulfur relatif stabil, perubahan besar pada C, H, dan O secara langsung meningkatkan kualitas pembakaran biomassa dan mengurangi emisi saat pembakaran. Ini menunjukkan bahwa waktu tinggal yang optimal penting untuk memaksimalkan efisiensi energi dan stabilitas kimia biomassa.

d. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Hidrofobisitas

Durasi pemanasan yang lebih lama memungkinkan pembentukan struktur karbon dan lignin yang lebih stabil, yang pada akhirnya

berkontribusi terhadap peningkatan sifat hidrofobisitas. (Hidayat dkk., 2020) mengungkapkan bahwa torefaksi selama 30 menit pada suhu tinggi menyebabkan lignin yang melunak selama pemanasan mengalami *re-solidifikasi* saat pendinginan. Proses ini menghasilkan lapisan pelindung yang menutupi permukaan pelet, menjadikannya lebih tahan terhadap penyerapan air. Biomassa yang ditorefaksi dengan waktu tinggal optimal tidak hanya lebih padat secara energi tetapi juga lebih tahan terhadap kelembapan lingkungan. Hal ini sangat penting dalam konteks penyimpanan dan transportasi, terutama pada lingkungan dengan tingkat kelembaban yang cukup tinggi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini 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 2.

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



Gambar 2. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket*.

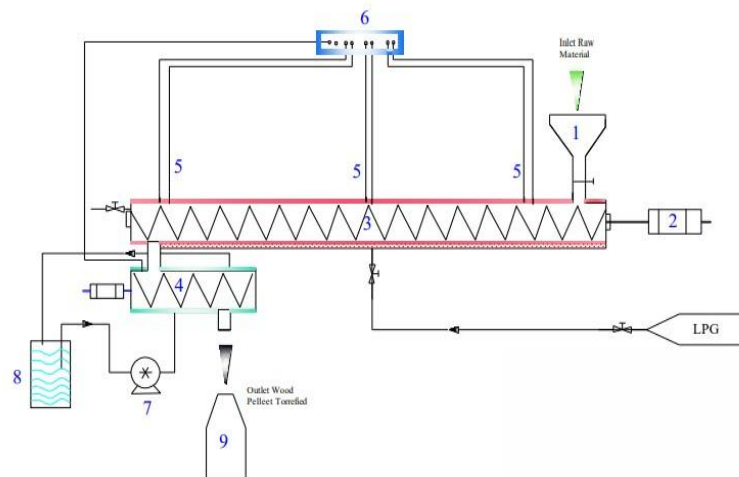
Alat utama yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain: reaktor torefaksi tipe tubular seperti pada Gambar 2, pemantik api, gas LPG 12 kg, regulator LPG, *thermocouple* tipe K, 12 *Channel Temperature Recorder Datalogger*. Sedangkan alat pendukung yang digunakan pada penelitian kali ini antara 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 1.

Tabel 1. Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.

• 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 caflo</i> ™ AF
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</i> tipe K
• Sistem Pendingin <i>Cooling Char</i>	
Sistem Sirkulasi Air	: <i>Water Pump</i>

2. Persiapan Eksperimental *Set Up*

Gambar 3 memperlihatkan skema instalasi proses pengujian torefaksi yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem ini terdiri dari reaktor torefaksi, sistem pemanas berbahan bakar LPG, alat pengendali temperatur, serta perangkat pendukung lainnya yang berfungsi untuk memastikan proses berlangsung sesuai dengan variabel penelitian yang telah ditentukan.



Gambar 3. Instalasi Proses Pengujian Torefaksi (Amrul dkk., 2025).

Keterangan:

1. *Feeding Hooper*
2. *Electromotor*
3. Tabung Reaktor dilengkapi dengan *burner*
4. *Cooling Char*
5. *Thermocouple*
6. *Temperarture recorder datalogger 12 channel*
7. *Water pump*
8. *Water tank*
9. Penampung produk torefaksi

3. *Memory Logger*

Memory logger memiliki bentuk dan tampilan seperti pada Gambar 4. Dalam penelitian torefaksi biomassa, *Memory logger* digunakan untuk merekam data temperatur pada reaktor secara kontinu selama proses

berlangsung. Sensor suhu (termokopel) yang dipasang pada beberapa titik reaktor dihubungkan dengan *Memory logger*, sehingga perubahan temperatur dapat dimonitor secara *real-time* dengan akurasi tinggi. Data ini penting untuk mengetahui kestabilan proses, kecepatan pemanasan, serta distribusi suhu di dalam reaktor.

Selain itu, *memory logger* juga memungkinkan perekaman parameter lain seperti perubahan arus listrik pada pemanas atau keluaran sinyal dari sensor tambahan. Data yang terekam dapat disimpan dalam bentuk digital untuk kemudian dianalisis, misalnya untuk membandingkan pengaruh variasi temperatur, waktu tinggal, maupun ukuran sampel terhadap hasil torefaksi.



Gambar 4. *Memory Logger*.

4. *Oxygen Bomb Calorimeter*

Oxygen bomb calorimeter merupakan peralatan yang digunakan untuk menentukan nilai kalor suatu bahan bakar, yaitu besarnya energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran sempurna. Pengujian dilakukan dengan membakar sampel di dalam ruang tertutup yang berisi oksigen murni pada tekanan tinggi. Prinsip kerja alat ini mengacu pada hukum kekekalan energi (Hukum I Termodinamika), di mana energi panas yang dilepaskan selama pembakaran akan ditransfer dan diserap oleh air yang mengelilingi ruang pembakaran. Perubahan suhu air tersebut kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan nilai kalor bahan bakar yang diuji. *Oxygen bomb calorimeter* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *Oxygen Bomb Calorimeter*

5. *Wood Chip Hevea Brasiliensis*

Bahan atau sampel biomassa yang digunakan pada penelitian ini yaitu *wood chip hevea brasiliensis* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sampel *Wood Chip Hevea Brasiliensis*.

Sampel biomassa *Wood Chip Hevea Brasiliensis* memiliki komposisi kimia dalam keadaan mentah pada Tabel 2 (Efiyanti dkk, 2020).

Tabel 2. Komposisi Kimia *Wood Chip Hevea Brasiliensis*

Komposisi	<i>Hevea brasiliensis</i>
Lignin (%)	30,11
Selulosa (%)	43,13
Hemi selulosa (%)	13,59
Moisture Content (%)	12,25
Calorific Value (MJ/kg)	17,58

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel biomassa *wood chip hevea brasiliensis* dengan ukuran yang tidak seragam atau berbentuk *wood chip* dengan rentang ukuran sebesar 2-4 cm. Proses torefaksi dilakukan dengan tiga variasi waktu tinggal (*residence time*) diantaranya 10, 20, dan 30 menit dengan tiga variasi temperatur sebesar 250°C, 275°C dan 300°C. Massa sampel biomassa *wood chip hevea brasiliensis* dari masing-masing waktu tinggal yang akan digunakan adalah 0,5 kg, sehingga total massa biomassa untuk semua variasi waktu tinggal dan temperatur pada penelitian ini adalah 5 kg. Rancangan penelitian ini adalah dengan mengamati beberapa parameter diantaranya nilai kalor, nilai *proximate*, *mass yield*, *energy yield* serta *hydrophobicity* dan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rancangan Penelitian

Variabel	Temperatur (°C)	Waktu Tinggal (Menit)	Massa Sample (Kg)	Parameter Yang Diuji
1	250	10	0,5	<i>Caloric Value, Mass Yield, Energy Yield, Proximate Analysis, dan Hydrophobicity Analysis.</i>
2	250	20		
3	250	30		
4	275	10		
5	275	20		
6	275	30		
7	300	10		
8	300	20		
9	300	30		

3.4 Prosedur Pengujian

3.4.1 Prosedur Pengujian Torefaksi

Adapaun 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 250°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 *wood chip hevea brasiliensis* ke dalam reaktor melalui *hooper* dan menunggu sampel keluar dengan *residence time* selama 10 menit.
12. Mendorong pendorong besi pada *cooling char*, setelah 10 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 ulangi langkah 11 – 12.

14. Menaikan temperatur dengan memperbesar bukaan katup regulator LPG hingga T1,T2 dan T3 mencapai temperatur 300°C dan ulangi langkah 11 – 12.
15. Ulangi langkah 7 – 12 untuk variasi waktu tinggal yang akan diujikan yaitu 20 dan 30 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 sebagaiudukan 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 Hidrofobisitas

Prosedur uji hidrofobisitas 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. Timbang sampel menggunakan neraca digital dengan ketelitian tinggi untuk memperoleh massa awal sampel kering.
4. Masukkan sampel ke dalam wadah air dan pastikan seluruh bagian terendam.
5. Catat waktu saat sampel mulai bersentuhan dengan air. Sampel ditenggelamkan sepenuhnya ke dalam air pada suhu ruang selama 2 jam tanpa pengadukan.
6. Mengeringkan permukaan sampel setelah direndam selama 2 jam.

7. Timbang sampel menggunakan neraca digital dengan ketelitian tinggi untuk memperoleh massa akhir setelah perendaman.
8. Melakukan perhitungan penyerapan air pada sampel menggunakan Persamaan 3.
9. 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 dua variabel kunci, yaitu temperatur dan waktu tinggal. 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 degradasi secara bertahap pada suhu yang lebih tinggi. Dengan demikian, penggunaan tiga titik temperatur ini diharapkan 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 10, 20 dan 30 menit pada setiap variasi temperatur. Pemilihan durasi ini didasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa waktu sekitar 10 - 30 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 dua 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 *dry base* (db) 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 pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah studi literatur dari berbagai sumber jurnal dan buku tentang biomassa, torefaksi, reaktor torefaksi, karakteristik bahan bakar padat, mekanisme torefaksi dan potensi biomassa sebagai sumber energi alternatif.

2. Persiapan Sampel Biomassa

Tahapan kedua yaitu mencari sampel biomassa limbah kayu karet. Limbah kayu karet yang digunakan berasal dari batang kayu karet yang sudah tidak mampu menghasilkan getah karet atau batang kayu yang sudah tumbang. Selanjutnya dilakukan pemotongan sampel menjadi bentuk *wood chip* menggunakan mesin pemotong kayu dengan ukuran sekitar 2-4 cm agar memudahkan saat pemasukan sampel pada reaktor torefaksi. Sampel yang sudah dipotong tersebut kemudian di sortir menjadi 10 bagian dengan massa dari masing-masing bagian sebesar 0,5 kg dan di bungkus dalam plastik kedap udara.

3. Persiapan Alat Torefaksi

Mempersiapkan *pulley* yang sesuai dengan kebutuhan waktu tinggal dan persiapan alat yang dibutuhkan dalam penelitian. Semua peralatan

dipersiapkan baik itu alat utama maupun pendukung diantaranya yaitu mengganti *thermocouple* yang telah rusak serta membeli peralatan pendukung seperti pemantik api, gas LPG, wadah sampel dan baterai untuk timbangan dan *temperature recorder catalogger*.

4. Proses Pengujian Torefaksi

Pada tahapan ini dilakukan pengujian torefaksi dengan sampel *wood chip hevea brasiliensis* sebanyak 1x pengujian untuk setiap variasi waktu tinggal yang digunakan yaitu 10, 20 dan 30 menit, dengan dua variasi temperatur digunakan yaitu 250°C, 275°C dan 300°C.

5. Pengujian Laboratorium

Pada tahapan ini sampel mentah dan produk hasil torefaksi yang telah diperoleh akan dilakukan uji laboratorium untuk setiap variasi yang digunakan. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian nilai kalor, pengujian nilai *proximate*, dan pengujian hidrofobisitas.

6. Analisis Hasil Seluruh Pengujian

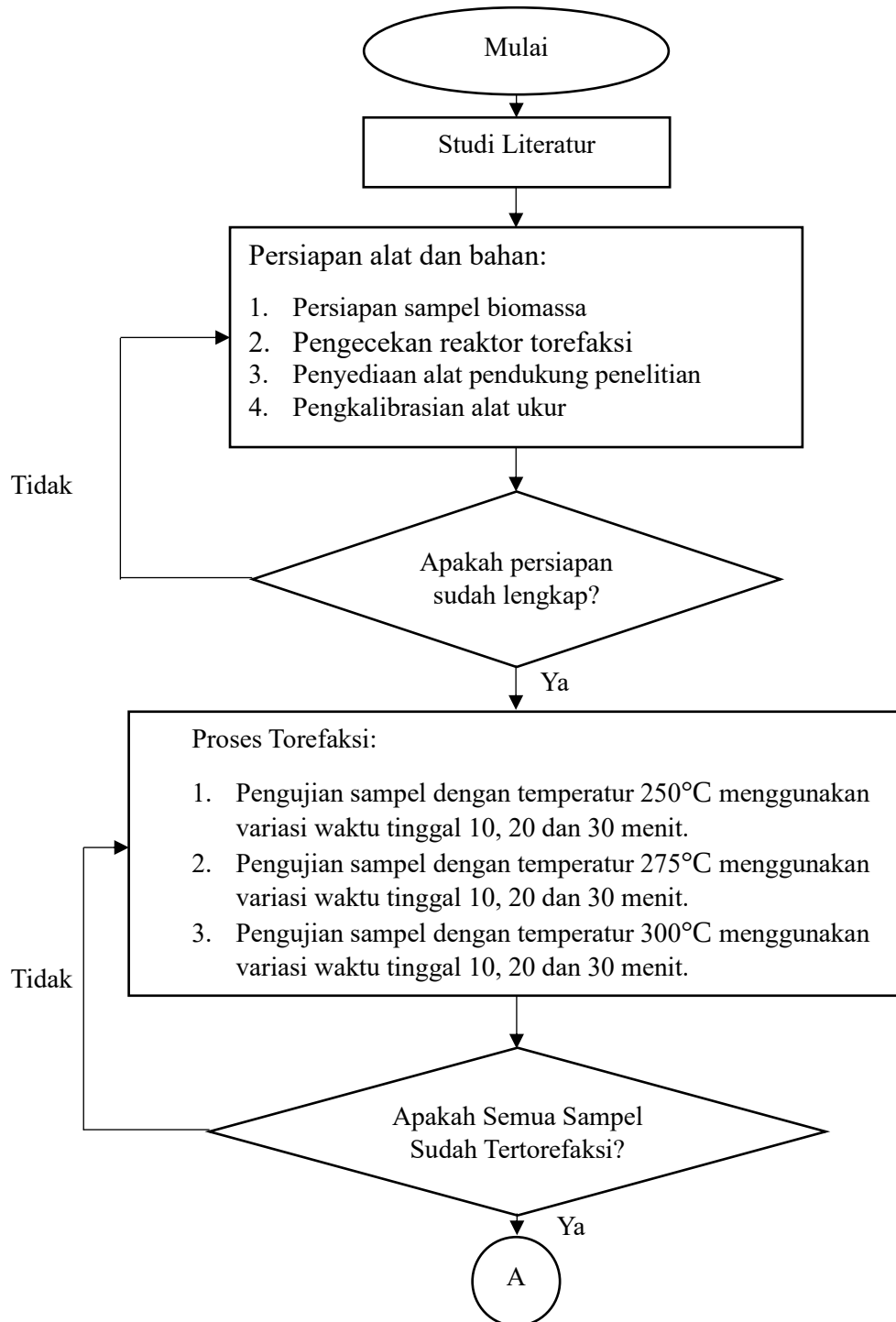
Setelah semua data telah terkumpul termasuk hasil pengujian laboratorium, tahapan selanjutnya adalah menganalisis semua data pengujian hasil laboratorium. Analisis yang dilakukan meliputi analisis *proximate*, *calorific value*, *energy yield*, *mass yield* dan *hydropobicity analysys*.

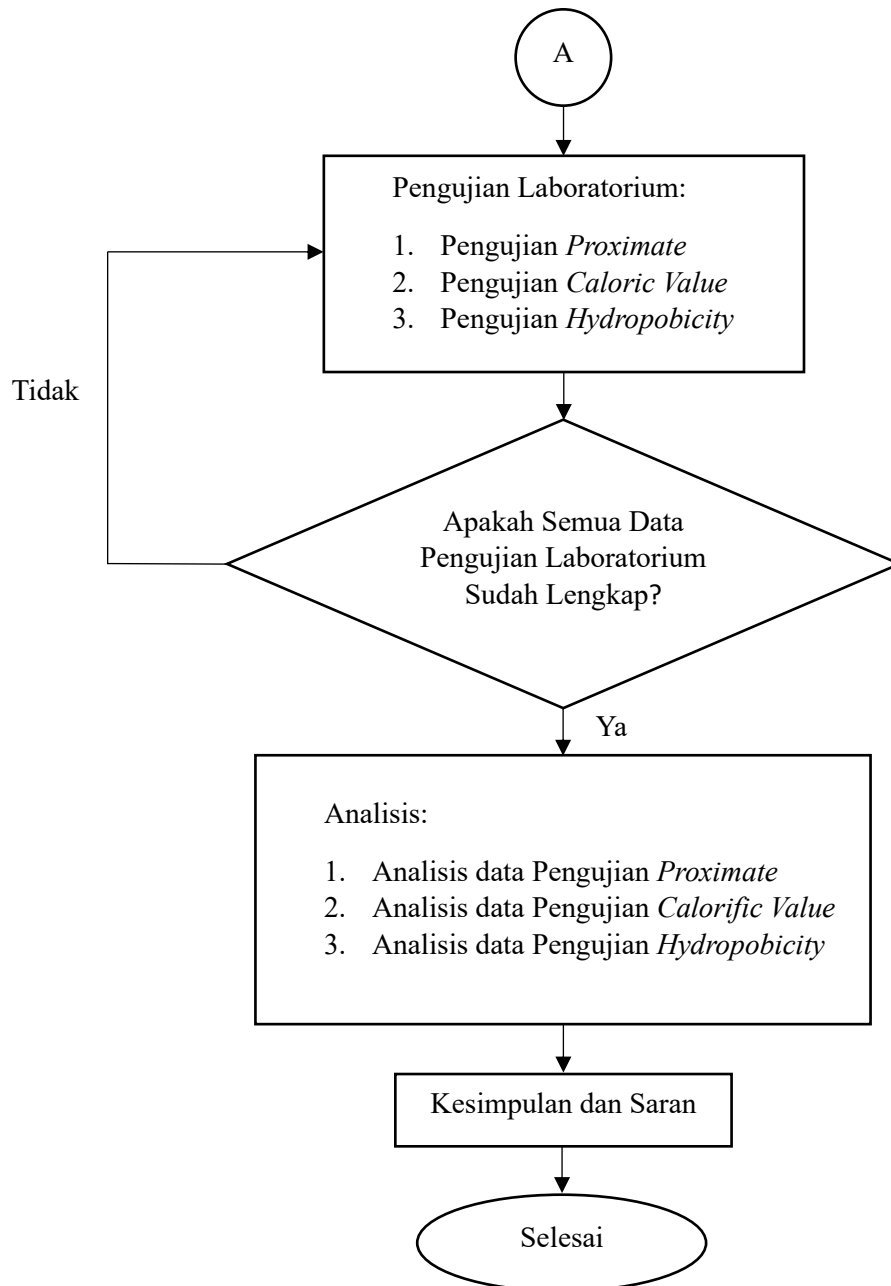
7. Kesimpulan

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah dengan membuat kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan dituangkan dalam bentuk laporan tugas akhir.

3.7 Alur Tahapan Penelitian

Adapun alur tahapan penelitian untuk pengujian sampel biomassa dengan proses torefaksi dapat dilihat pada Gambar 7.





Gambar 7. *Flowchart* Alur Penelitian.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses torefaksi dengan variasi temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C serta waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit terbukti meningkatkan nilai kalor limbah kayu karet (*hevea brasiliensis*). Pada temperatur 250°C, nilai kalor meningkat dari sekitar 4698,5 kkal/kg (10 menit) menjadi 4965,39 kkal/kg (30 menit). Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada temperatur 275°C, di mana nilai kalor mencapai 4820,41 kkal (10 menit) menjadi 5117,2 kkal/kg (30 menit). Nilai kalor tertinggi diperoleh pada temperatur 300°C (30 menit), yaitu sebesar 5395,31 kkal/kg.
2. Proses torefaksi pada *wood chip hevea brasiliensis* dengan variasi temperatur 250°C, 275°C, dan 300°C dengan waktu tinggal 10, 20, dan 30 menit mampu meningkatkan kualitas bahan bakar padat secara nyata. Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan waktu tinggal menyebabkan penurunan kadar air dan zat volatil serta peningkatan *fixed carbon*. Nilai *fixed carbon* meningkat dari sampel *raw* sebesar 4,885% menjadi 14,07% pada temperatur 300°C dengan waktu tinggal 30 menit.
3. Nilai *mass yield* biomassa kayu karet menurun seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu tinggal, dari sekitar 82% pada 250°C - 30 menit hingga turun drastis menjadi 61% pada 300°C - 30 menit. *Energy yield* menunjukkan pola yang dipengaruhi oleh keseimbangan antara peningkatan nilai kalor dan penurunan *mass yield*. Pada temperatur 250°C, *energy yield* berada pada kisaran 90,89% - 93,8%, sedangkan pada temperatur 275°C mencapai 90,24% - 90,38%. Pada temperatur 300°C,

meskipun nilai kalor meningkat signifikan, *energy yield* menurun hingga sekitar 73,46% pada 30 menit.

4. Sifat hidrofobisitas biomassa limbah kayu karet mengalami penurunan setelah proses torefaksi pada setiap variasi temperatur dan waktu tinggal. Bahan baku (*raw*) memiliki persentase penyerapan air sebesar 14,38%. Pada temperatur 250°C, nilai penyerapan air tercatat sebesar 13,64% (10 menit), 12,94% (20 menit), dan 12,28% (30 menit). Pada temperatur 275°C, nilai tersebut menurun menjadi 10,27% (10 menit), 8,40% (20 menit), dan 7,11% (30 menit). Sementara itu, pada temperatur 300°C, persentase penyerapan air masing-masing sebesar 7,09% (10 menit), 6,33% (20 menit), dan 4,82% (30 menit).

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini antara lain:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melengkapi pengujian karakteristik bahan bakar padat hasil torefaksi kayu karet dengan melakukan *ultimate analysis*, sehingga perubahan komposisi unsur biomassa dapat dianalisis secara lebih menyeluruh. Ketersediaan data ini diharapkan dapat memperkuat evaluasi kualitas energi biomassa serta keterkaitannya dengan nilai kalor dan *energy yield*.
2. Proses torefaksi pada penelitian ini masih menggunakan reaktor manual yang menyebabkan waktu pengujian relatif lama dan kontrol kondisi operasi kurang optimal. Oleh karena itu, penggunaan reaktor torefaksi dengan sistem otomatis atau semi - otomatis pada penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan efisiensi proses, kestabilan temperatur, serta ketelitian pengaturan waktu tinggal.
3. Proses preparasi sampel biomassa pada penelitian ini masih dilakukan secara manual menggunakan parutan kelapa, sehingga memerlukan waktu

yang relatif lama dan kurang efisien. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan peralatan preparasi mekanis yang lebih sesuai, seperti *wood chipper* atau *grinder*, untuk meningkatkan efisiensi waktu dan kemudahan proses persiapan sampel. Peningkatan efisiensi preparasi sampel diharapkan dapat mendukung kelancaran pelaksanaan penelitian serta konsistensi proses torefaksi secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul, A., Apriyanto, A., Prayitno, H., & Azmar, M. S. (2025). Effect of residence time on the torrefaction characteristics of Calliandra wood as solid biofuel. *Jurnal Polimesin*, 23(3), 293-300. <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i3.6656>
- Apriyanto, A., Amrul, A., Prayitno, H., & Iskandar, H. N. (2025). Pengaruh Variasi Temperatur Torefaksi Terhadap Karakteristik Wood Pellet dari Limbah Furnitur Kayu Campuran. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 14(2). <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v14i2.4290>
- Apriyanto, A. (2020). Torefaksi Kontinu Munciple Solid Waste (MSW) pada screw conveyor reaktor dengan sistem pemanas heat transfer oil. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 5(1), 35-44.
- 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>
- Bazenet, R. A., Hidayat, W., Ridjayanti, S. M., Riniarti, M., Banuwa, I. S., Haryanto, A., & Hasanudin, U. (2021). Pengaruh kadar perekat terhadap karakteristik briket arang limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 10(3), 283–295. <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-lv10.i3.283-295>

Chen, H., Mehmood, D., Dahlquist, E., & Kyprianidis, K. (2023, September 26–27). *Retrofitting biomass combined heat and power plant for biofuel production*. In SIMS 64 Conference, Västerås, Sweden. Mälardalen University.

Dewi, T. U., & Nugroho, P. N. A. (2017). Studi eksperimen pengaruh torefaksi pada karakteristik bahan bakar padat dari biomassa residu hutan. *Jurnal Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*, Edisi II, 62–64.

Efiyanti, L., Syafii, W., Pari, G., & Komarayati, S. (2020). Chemical properties and pulp characteristics of rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012061>

Efiyanti, L., Wati, S. A., & Maslahat, M. (2020). Pembuatan dan analisis karbon aktif dari cangkang buah karet dengan proses kimia dan fisika. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 14(2), 94–108.

Fernando, A. Q., & Helwani, Z. (2016). Torefaksi tandan kosong sawit: Pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi. *JOM FTEKNIK*, 3(2), 1–6.

Hidayat, W., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., & 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. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.59172>

Karkach, B., Tahiri, M., Haibi, A., Bouya, M., & Kifani-Sahban, F. (2023). Review on fast pyrolysis of biomass for biofuel production from date palm. *Applied Sciences*, 13(18), 10463. <https://doi.org/10.3390/app131810463>

- Karmaker, S. C., Hosan, S., Rahman, M. M., Sen, K. K., & Saha, B. B. (2021). Dynamic linkage between biomass energy consumption and ecological footprint: A panel analysis for BRICS countries. *Proceedings of International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES)*, 7, 32–38. <https://doi.org/10.5109/4738556>
- Khairiah, Ropiudin, Dewi, P. P. I. P., Suaniti, N. M., Lateko, A. A. H., Suyasa, W. B., Murtius, W. S., Syska, K., Budaraga, I. K., & Putra, K. G. D. (2024). *Rekayasa bioenergi*. CV HEI Publishing Indonesia.
- 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.
- Mangalla, L. K., Sisworo, R. R., & Pagiling, L. (2023). Perbaikan kualitas energi biomassa kayu jati menggunakan torefaksi microwave untuk produksi bioarang. *TEKNIK*, 44(1), 15–22. <https://doi.org/10.14710/teknik.v44i1.48278>
- Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S. L., Wistara, N. J., Sari, R. K., & Syafii, W. (2018). Karakteristik kimia biomassa untuk energi (Chemical characteristics of biomass for energy). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 16(1), 44–53.
- Nursia, N., Syahbanu, I., & Shofiyan, A. (2018). Kinetika adsorpsi fenol dalam asap cair pada arang aktif dari cangkang buah karet (*Hevea brasiliensis*). *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 7(4), 60–65.
- Novitasari, D., Lamuru, A. S., & Mahirullah. (2024). Pembuatan karbon aktif dari cangkang buah karet melalui karbonasi suhu 600 °C dengan aktivator KOH. *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia dan Terapannya*, 6(1), 35–44.

- Prayitno, H., Amrul, Lestari, R., & Kurniawansah, R. (2024). Potential torrefaction of tropical forest fruits waste. *Journal of Physics: Conference Series*, 2739, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2739/1/012005>
- Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., & Hasanudin, U. (2020). Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(1), 63–70. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v9.i1.63-70>
- Stephen, T. M., Feranmi, A. T., & Joseph, F. O. (2023). *Potential usage of selected agro-residue as a biofuel production sources: Physiochemical evaluation approach*. *Journal of Energy Research and Reviews*, 13(4), 56–63. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i4271>
- Sulistio, Y., Febryano, I. G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., & Hidayat, W. (2020). Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan Electric Furnace terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*)(Effects of Torefaction with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor and Electric Furnace on the Properties of Jabon (*Anthocephalus cadamba*) Pellets). *Jurnal Sylva Lestari*, 8(1), 65-76.
- Teh, J. S., Teoh, Y. H., How, H. G., & Sher, F. (2021). Thermal analysis technologies for biomass feedstocks: A state-of-the-art review. *Processes*, 9(9), 1610. <https://doi.org/10.3390/pr9091610>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384–401. <https://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>

- Udjianto, T., Sasono, T., & Manunggal, B. P. (2021). Potensi sekam padi sebagai bahan bakar alternatif PLTBm di Sumatra Barat. *Jurnal Energi*, 11(1), 11–20.
- Umer, M., Brandoni, C., Jaffar, M., Hewitt, N. J., Dunlop, P., Zhang, K., & Huang, Y. (2024). An experimental investigation of hydrogen production through biomass electrolysis. *Processes*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.3390/pr12010112>
- Wahyudi, R., Amrul, & Irsyad, M. (2020). Karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi limbah tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 20(2), 16357–21083. <https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.706>
- Wahyudi, T. S., Hardianto, T., & Laily, N. (2020). Pengaruh torefaksi terhadap kualitas bahan bakar padat dari tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur (JMPM)*, 5(2), 123–130. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v5i2.14109>
- Wenasa, A. A., & Hardianto, T. (2021). Pengaruh torefaksi terhadap pencucian potassium dalam konversi tandan kosong kelapa sawit menjadi bahan bakar padat ramah lingkungan. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur (JMPM)*, 5(2), 123–140. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v5i2.14109>