

**PENGARUH SUHU DAN DURASI TOREFAKSI TERHADAP SIFAT
ENERGI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN PELET BAMBU
BETUNG (*Dendrocalamus asper*) SEBAGAI
ALTERNATIF BIOENERGI**

(Skripsi)

Oleh

**Fania Naviza
2114151069**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH SUHU DAN DURASI TOREFAKSI TERHADAP SIFAT ENERGI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) SEBAGAI ALTERNATIF BIOENERGI

Oleh

Fania Naviza

Pada penelitian ini, pelet kayu karet dan pelet bambu betung ditorefaksi menggunakan variasi suhu 200°C, 250°C, dan 300°C dengan durasi 20, 30, dan 40 menit. Pelet biomassa hasil torefaksi dianalisis untuk mengetahui sifat fisis, nilai proksimat, nilai kalor, gugus fungsi, serta struktur kristal. Torefaksi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik pelet biomassa, seperti penurunan kerapatan sebesar 1,27 g/cm³ dan 1,29 g/cm³ menjadi 1,05 g/cm³ dan 1,03 g/cm³ setelah ditorefaksi. Pelet biomassa hasil torefaksi memberikan penurunan kadar air pada pelet biomassa kontrol sebesar 9,51% dan 9,23%, nilai kadar air pada pelet kayu karet menjadi 1,72% dan kadar air pelet bambu betung 1,92%. Pelet biomassa hasil torefaksi memberikan peningkatan pada analisis proksimat dan nilai kalor. Pada uji ketahanan air, pelet torefaksi suhu 300°C tidak mengalami perubahan fisik setelah perendaman selama 24 jam. Perubahan warna (ΔE^*) pelet kayu karet dan pelet bambu betung yang berubah total menjadi berwarna hitam pada suhu 300°C. Torefaksi menyebabkan perubahan gugus fungsi seperti gugus OH, C-H, C=O, C-O, dan C-O-C dengan analisis FTIR. Torefaksi mengubah struktur kristal pada pelet biomassa kontrol menjadi amorf setelah ditorefaksi.

Kata kunci: Torefaksi, Biomassa, Bioenergi, Pelet Hitam.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DURATION OF TORREFACTION ON THE ENERGY PROPERTIES OF RUBBERWOOD PELLETS (*Hevea brasiliensis*) AND BETUNG BAMBOO PELLETS (*Dendrocalamus asper*) AS BIOENERGY ALTERNATIVE

By

Fania Naviza

In this study, rubberwood pellets and betung bamboo pellets were torrefied using temperature variations of 200°C, 250°C, and 300°C with durations of 20, 30, and 40 minutes. The torrefied biomass pellets were analyzed to determine their physical properties, proximate value, calorific value, functional groups, and crystal structure. Torrefaction has a significant impact on the characteristics of biomass pellets, such as a reduction in density to 1.05 g/cm³ and 1.03 g/cm³ after torrefaction. The torrefied biomass pellets showed a reduction in moisture content compared to the control biomass pellets, with the moisture content of rubberwood pellets being 1.72% and the moisture content of betung bamboo pellets being 1.92%. The torrefied biomass pellets show an improvement in proximate analysis and calorific value. In the water resistance test, the 300°C torrefied pellets did not undergo any physical changes after being submerged for 24 hours. The color change (ΔE^*) of rubberwood pellets and betung bamboo pellets completely turned black at 300°C. Torrefaction causes changes in functional groups such as OH, C-H, C=O, C-O, and C-O-C with FTIR analysis. Torrefaction changes the crystal structure of the control biomass pellets to amorphous after torrefaction.

Key words: Torrefaction, Biomass, Bioenergy, Black Pellet.

**PENGARUH SUHU DAN DURASI TOREFAKSI TERHADAP SIFAT
ENERGI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN PELET BAMBU
BETUNG (*Dendrocalamus asper*) SEBAGAI
ALTERNATIF BIOENERGI**

Oleh

Fania Naviza

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian

: **PENGARUH SUHU DAN DURASI
TOREFAKSI TERHADAP SIFAT ENERGI
PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)
DAN PELET BAMBU BETUNG
(*Dendrocalamus asper*) SEBAGAI
ALTERNATIF BIOENERGI**

Nama Mahasiswa

: **Fania Nayiza**

Nomor Pokok

: **2114151069**

Mahasiswa Jurusan

: **Kehutanan**

Fakultas

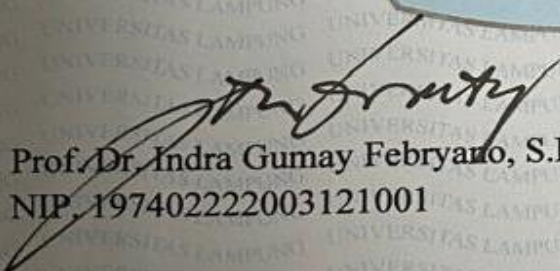
: **Pertanian**

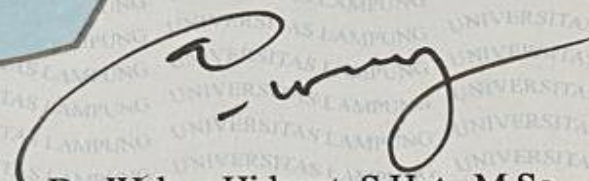
Tanggal

: **28 Mei 2025**

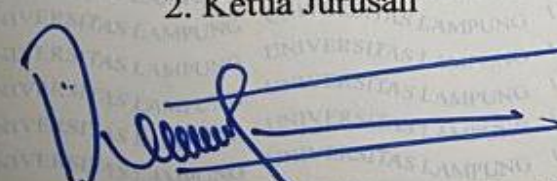
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.
NIP. 197402222003121001


Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.
NIP. 197911142009121001

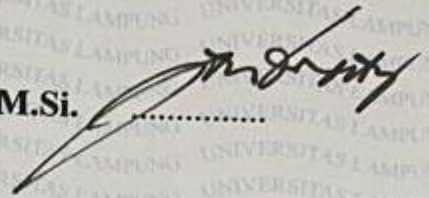
2. Ketua Jurusan


Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.
NIP. 19731012199032001

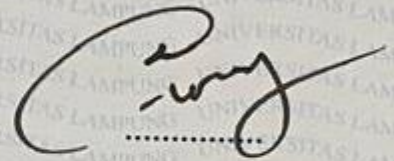
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

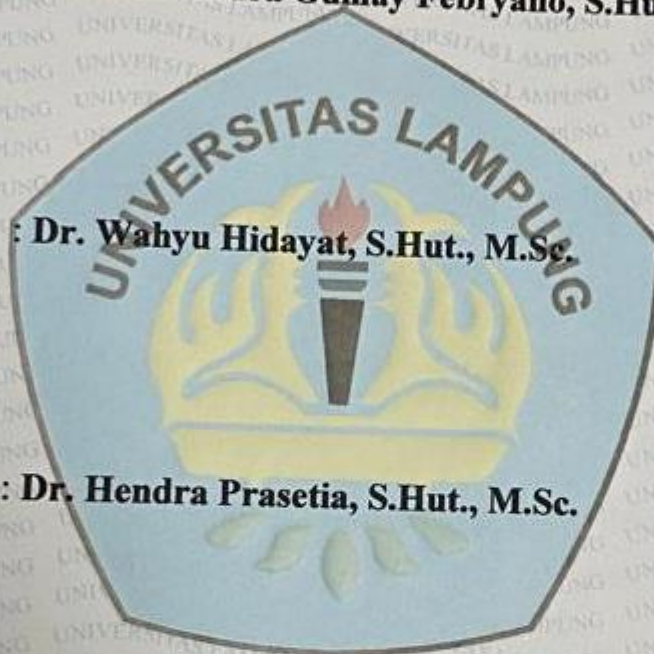
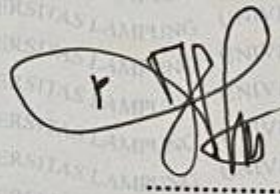
Ketua : Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.



Sekretaris : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Anggota : Dr. Hendra Prasetya, S.Hut., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 22 Mei 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fania Naviza

NPM : 2114151069

Jurusan : Kehutanan

Alamat : Jl. Tupai, Gg. Swadaya 2, Kedaton, Bandar Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sungguh-sungguh, bahwa skripsi saya yang berjudul:

“Pengaruh Suhu dan Durasi Torefaksi Terhadap Sifat Energi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) dan Pelet Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) Sebagai Alternatif Bioenergi”

Merupakan benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Selanjutnya, saya juga tidak keberatan apabila sebagian atau seluruh data pada skripsi ini digunakan oleh dosen dan/atau program studi untuk kepentingan publikasi. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 28 Mei 2025

Yang membuat pernyataan



Fania Naviza

NPM: 2114151069

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Fania Naviza, lahir di Bandar Lampung pada tanggal 24 Maret 2004 merupakan anak ke lima dari lima bersaudara. Penulis lahir dari pasangan suami istri Bapak Sarkani dan Ibu Yanti. Penulis menyelesaikan pendidikan kanak-kanak di TK Al Azhar Bandar Lampung tahun 2009, dan dilanjutkan pendidikan dasar di SDN 1 Kedaton Bandar Lampung hingga tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 7 Bandar Lampung hingga lulus pada tahun 2018. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMAS Perintis 2 Bandar Lampung dan lulus tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai organisasi. Penulis aktif sebagai asisten dosen pada mata kuliah Kimia Dasar pada tahun 2023 dan mata kuliah Kewirausahaan pada tahun 2024. Penulis aktif sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyulva) periode 2021-2024. Kegiatan akademik yang pernah diikuti penulis yaitu penulis mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Universitas Lampung di Desa Tegal Yoso tahun 2023. Pada tahun 2024 penulis mengikuti kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Kerinjing, Kabupaten Lampung Selatan. Pada tahun yang sama penulis mengikuti Pengabdian Kepada Masyarakat (PKM) di Kesatuan Pengelolaan Hutan (KPH) Batuteji, Kabupaten Tanggamus. Penulis juga mengikuti kegiatan Praktik Umum (PU) selama 20 hari di hutan pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM)

yaitu KHDTK Getas Kecamatan Kradenan, Blora, Jawa Tengah dan KHDTK Wanagama, Jawa Tengah. Penulis berkesempatan mengikuti kegiatan Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) *batch 7* Kampus Merdeka sebagai Pendamping Perhutanan Sosial dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan di Sumatera Utara.

Selama menjadi mahasiswa, penulis telah mempublikasikan artikel ilmiah sebagai penulis utama dengan judul “Peluang Keanekaragaman Jenis Biomas Untuk Energi Biomas” yang terbit pada *Journal Universitas Gorontalo* tahun 2023. Pada tahun yang sama penulis menulis buku sebagai anggota dengan tim Gunardi Djoko Winarno, Arief Darmawan, Wahyu Hidayat, dan Hari Kaskoyo berjudul “Eksplorasi dan Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat; Studi Kasus di Taman Nasional Way Kambas Melalui Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati”. Pada publikasi ilmiah *Jurnal Pengabdian Fakultas Pertanian Universitas Lampung*, penulis telah mempublikasikan jurnal nasional sebagai penulis kedua dengan judul “Peningkatan Persepsi Petani Hutan Kemasyarakatan dalam Pemilihan Jenis Pohon Produktif pada Kelompok Gapoktan Wana Tani Lestari di KPH Batutegi, Tanggamus” tahun 2024. Pada tahun 2025 penulis mengikuti “Seminar Nasional Konservasi” serta mempublikasikan jurnal berjudul “Torefaksi Biomassa Kayu Sebagai Alternatif Sumber Energi yang Berkelanjutan”.

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Suhu Dan Durasi Torefaksi Terhadap Sifat Energi Pelet Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*) dan Pelet Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) Sebagai Alternatif Bioenergi”**. mendapatkan syafa’atnya. Penulis menyadari bahwa dalam proses pengerjaan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari kesulitan dan rintangan yang penulis hadapi. Namun itu semua dapat terlewati berkat rahmat dan ridho Allah SWT serta bantuan, pengarahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN. Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Ibu Dr Bainah Sari Dewi, S.Hut, M.P. IPM., selaku Kepala Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku Pembimbing Pertama penelitian atas segala bimbingan, bantuan, nasihat, saran, kesabaran, edukasi, dan segala kebaikannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua penelitian atas segala bimbingan, bantuan, nasihat, saran, kesabaran, edukasi, dan segala kebaikannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
6. Bapak Dr. Hendra Prasetya, S.Hut., M.Sc. selaku Pembahas/Penguji penelitian atas segala saran, kritik, motivasi, inspirasi, dan kesabaran dalam memberikan masukan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan kepada penulis.

8. Seluruh Bapak Ibu Dosen dan Staff Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan membantu selama proses perkuliahan dan menuntut ilmu di Universitas Lampung.
9. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian sangat membantu dalam kelancaran dan keberhasilan penelitian ini. Semoga kerja sama ini dapat terus berlanjut dan memberikan manfaat yang lebih besar.
10. Orang tua penulis (Alm) Sarkani dan Yanti yang telah membimbing penulis sejak kecil. Terima kasih atas kepercayaannya dan mendukung segala keputusan yang penulis pilih, selalu memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, semangat, dan segalanya. Semoga Allah membalas dengan Jannah-Nya. Aamiin Allahumma Aamiin.
11. Kakak penulis Indah Purwanti, A.Md., Ira Susanti, S.Pd., Bagas Ari Wibowo, S.H., Tri Suseno, S.Kom, dan Aryani Putri Islami, S.Si., yang selalu membantu penulis dalam segala hal, mendengarkan keluh kesah, memberikan nasihat, dan dukungan.
12. Keponakan penulis Anatasia Aqila Bura dan Gibran Alfarezel Wibowo yang selalu membuat penulis tertawa ketika melihat tingkah lakunya, memberikan semangat, dan dukungan.
13. Teman seperbimbingan Izzuddin, Aji, Faiz, dan Anom yang telah membersamai, membantu, dan memotivasi selama pengambilan data skripsi.
14. Sahabat Penulis (Vella, Nasywa, dan Cinta), yang telah menemani penulis hingga mendapat gelar Sarjana dan seterusnya.
15. Sahabat Seperjuangan “Ingpo-ingpo” (Anggi, Regita, Jilan, dan Elza), yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan hingga mendapat gelar Sarjana dan seterusnya.
16. Teman Seperjuangan (Mirza, Imala, Siska, Octa, Pia, dan Lisa) yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan hingga mendapat gelar Sarjana dan seterusnya.
17. Niki Zefanya atas lagunya yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan tulisan ini.

18. Angkatan 2021 “LABORIOSA” yang senantiasa memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis.
19. Terima kasih banyak atas segala bantuan dan doanya bagi seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.
20. Terakhir, terima kasih kepada diri sendiri yang telah berhasil di tahap ini.

Semoga Allah SWT membalas segala amal kebaikan kalian. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, Penulis memohon maaf atas segala kekurangan tersebut dan berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi siapapun yang membaca.

Bandar Lampung,
Penulis

Fania Naviza

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Kupersembahkan karya ini sebagai wujud bakti dan tanggung jawabku kepada:

*Kedua orang tuaku tercinta,
Ayahanda (Alm) Sarkani dan Ibunda Yanti yang telah membimbingku dengan
cinta dan kasih sayang sejak kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini, yang
selalu percaya serta mendukung keputusan yang kupilih, selalu
memberikan motivasi, dan segalanya.*

*Kakak-kakakku tercinta Indah Purwanti, A.Md.,
Ira Susanti, S.Pd., Bagas Ari Wibowo, S.H., Tri Suseno, S.Kom., dan Aryani Putri
Islami, S.Si, yang selalu mendoakan dan mendukungku.*

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Kerangka Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Biomassa	6
2.2 Bioenergi	9
2.3 Densifikasi.....	11
2.4 Pelet Kayu	13
2.5 Torefaksi.....	14
2.6 <i>Muffle Furncae</i> (MF)	17
2.7 Kayu Karet (<i>Hevea brasiliensis</i>)	18
2.8 Bambu Betung (<i>Dendrocalamus asper</i>).....	19
III. METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	25
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Metode Pengambilan Data	26
3.3.1 Penyaringan dan Penyortiran	26
3.3.2 Proses Torefaksi menggunakan Reaktor MF	26
3.4 Analisis Karakteristik	26

3.4.1 Sifat Fisis	26
3.4.2 Analisis Proksimat	28
3.4.3 Nilai Kalor	30
3.4.4 Analisis FTIR.....	30
3.4.5 Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	30
3.4.6 Analisis Deskriptif Kuantitatif.....	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Perubahan Warna	31
4.2 Kerapatan	36
4.3 Adsorpsi Uap Air	39
4.4 Daya Tahan Air	42
4.5 Analisis Proksimat	46
4.5.1 Kadar Air.....	47
4.5.2 Kadar Abu	48
4.5.3 Kadar Zat Menguap.....	49
4.5.4 Karbon Terikat	50
4.6 Nilai Kalor	52
4.7 Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR).....	54
4.8 Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	56
V. KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Perbedaan Biomassa Tradisional dan Biomassa Modern	8
2. Standar Mutu Pelet Kayu Berdasarkan SNI 8021:2014.....	14
3. Klasifikasi Nilai Rentang Warna	28
4. Perbandingan Kerapatan pada Berbagai Perlakuan Sebelum dan Sesudah Torefaksi	38
5. Pengujian daya tahan air pada pelet kayu karet	44
6. Pengujian daya tahan air pada pelet bambu betung	45
7. Analisis proksimat pelet kayu karet dan pelet bambu betung.....	47
8. Efek torefaksi terhadap nilai kalor	53
9. Jenis senyawa pada analisis FTIR pelet kayu karet dan pelet bambu betung	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran.....	5
2. Tahapan Proses Torefaksi	17
3. Bagian-Bagian <i>Muffle Furnace</i>	18
4. Kayu Karet	19
5. Bambu Betung.....	21
6. Klasifikasi Energi Terbarukan	24
7. Proses Torefaksi Menggunakan MF	27
8. Perbandingan perubahan warna pelet kayu karet pada perbedaan suhu dan waktu torefaksi.....	32
9. Perbandingan perubahan warna pelet bambu betung pada perbedaan suhu dan waktu torefaksi.....	33
10. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan L^* pada pelet kayu karet.....	34
11. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan L^* pada pelet bambu betung.....	34
12. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan a^* pada pelet kayu karet.....	35
13. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan a^* pada pelet bambu betung.....	35
14. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan b^* pada pelet kayu karet	36
15. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan b^* pada pelet bambu betung.....	36
16. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan ΔE^* pada pelet	

kayu karet.....	37
17. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan ΔE^* pada pelet bambu betung.....	37
18. Perbandingan kerapatan pelet kayu karet.....	39
19. Perbandingan kerapatan pelet bambu betung.....	39
20. Perubahan penyerapan uap air pelet kayu karet suhu 200°C	40
21. Perubahan penyerapan uap air pelet kayu karet suhu 250°C	41
22. Perubahan penyerapan uap air pelet kayu karet suhu 300°C	41
23. Perubahan penyerapan uap air pelet bambu betung suhu 200°C	41
24. Perubahan penyerapan uap air pelet bambu betung suhu 250°C	42
25. Perubahan penyerapan uap air pelet bambu betung suhu 300°C	42
26. Efek torefaksi terhadap kadar air	48
27. Efek torefaksi terhadap kadar abu.....	49
28. Efek torefaksi terhadap zat menguap	50
29. Efek torefaksi terhadap Karbon Terikat.....	52
30. Spektrum FTIR Pelet Kayu Karet.....	55
31. Spektrum FTIR Pelet Bambu Betung	55
32. Difraktogram XRD Pelet Kayu Karet.....	57
33. Difraktogram XRD Pelet Bambu Betung	58

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel	Halaman
1. Proses torefaksi pelet biomassa.....	75
2. Uji penyerapan air pelet kayu karet dan bambu betung	75
3. Uji kadar zat menguap pelet biomassa	76
4. Uji kadar abu pelet biomassa	76
5. Pengukuran pelet biomassa	77
6. Sampel analisis FTIR pelet biomassa hasil torefaksi	77
7. Sampel analisis XRD pelet biomassa hasil torefaksi	78
8. Penimbangan pelet biomassa	78
9. Analisis Zat Menguap	79
10. Analisis Kadar Abu	79
11. Analisis Adsorpsi Uap Air	80
12. Analisis warna	80
13. Analisis Kerapatan	80
14. Analisis Proksimat	81
15. Spektroskopi Pelet Bambu Betung.....	81
16. Spektroskopi Pelet Kayu Karet.....	81
17. Analisis FTIR Pelet Kayu Karet.....	82
18. Analisis FTIR Pelet Bambu Betung.....	82
19. Analisis XRD Pelet Bambu Betung.....	83
20. Analisis XRD Pelet Kayu Karet.....	83
21. Analisa XRD menggunakan <i>software</i> Highscore Plus.....	85

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan penduduk dunia terus meningkat setiap tahunnya, saat ini diperkirakan jumlah penduduk dunia mencapai 7,6 miliar jiwa. Bertambahnya jumlah penduduk dunia ini berdampak pada peningkatan penggunaan energi fosil. Namun ketersediaan bahan bakar fosil semakin menipis. Untuk itu pencarian sumber energi alternatif untuk bahan bakar harus dikembangkan (Arlianti, 2018). Penggunaan energi di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil. Namun ketersediaan sumber energi fosil sangat terbatas. Menurut Direktur Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2018) cadangan energi fosil semakin menipis. Data menunjukkan cadangan batu bara saat ini berkisar 38,84 miliar ton dan diperkirakan akan habis pada tahun 2085, sedangkan pasokan minyak sebesar 3,7 miliar barel diperkirakan akan habis pada tahun 2028, sedangkan cadangan bahan bakar gas sebesar 151,33 *trillion cubic feet* (TCF) diperkirakan akan habis pada tahun 2067 (Afriyanti *et al.*, 2020).

Cadangan energi akan semakin menipis akibat penggunaan energi fosil yang terus menerus. Melihat situasi penggunaan energi yang semakin meningkat, sangat diperlukan inovasi untuk mencari solusi penggunaan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan adalah energi biomassa. Hal ini ditunjang oleh ketersediaan bahan baku yang selalu dapat diperbarui (Arman *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2019). Beberapa bahan tersebut diantaranya ialah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan bambu (*Bambusoideae*).

Indonesia memiliki areal tanaman karet seluas 3,83 ha (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2022). Provinsi Lampung mempunyai luasan tanaman karet seluas 196.816 ha (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2021). Sedangkan hutan bambu di

Indonesia sekitar 2 juta ha (Rizqi *et al.*, 2023). Dalam proses pemanfaatan, khususnya pada saat kegiatan penebangan akan menghasilkan limbah industri penggergajian kayu berupa serbuk gergajian 10,6%, sebetan 25,9% dan potongan 14,3% sehingga total limbah sebesar 50,8% dari bahan baku yang digunakan (Adrian *et al.*, 2015; Utama *et al.*, 2019). Oleh sebab itu, limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan limbah bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dapat menjadi peluang besar sebagai biomassa.

Biomassa pada kayu karet memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi yang dihasilkan di akhir masa sadapnya, sehingga dapat berpotensi sebagai bioenergi (Riniarti, *et al.*, 2025; Suwito *et al.*, 2022). Bambu betung mempunyai karakteristik yang sama halnya dengan kayu, yaitu mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin dan zat ekstraktif (Hariz *et al.*, 2021; Moroz *et al.*, 2014; Suri *et al.*, 2024). Akan tetapi, ketika digunakan sebagai bioenergi, terdapat kelemahan, bambu memiliki kepekaan yang sangat tinggi terhadap air, sama seperti kayu. Kemampuan menyerap air menyebabkan tingginya kandungan air di dalamnya (Bui *et al.*, 2017; Murda *et al.*, 2022). Maka dari itu diperlukan efisiensi dengan melakukan densifikasi kayu karet dan bambu menjadi pelet biomassa.

Pelet berbahan dasar limbah biomassa dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi terbarukan (Rahman *et al.*, 2024; Rani *et al.*, 2023). Manfaat konversi biomassa menjadi pelet termasuk peningkatan nilai kalor per volume, penyimpanan dan pengangkutan yang mudah, serta ukuran dan kualitas yang seragam (Putri *et al.*, 2024; Saputra *et al.*, 2022). Konversi biomassa dapat menciptakan nilai tambah ekonomi, dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Selain itu, hal ini berkaitan dengan pencapaian tujuan *Sustainable Development Goals* (SDGs) atau tujuan pembangunan berkelanjutan, terutama pada poin 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan poin 13 (Penanganan Perubahan Iklim) (Prawitasari, 2025). Namun, pelet biomassa memiliki kekurangan, yaitu nilai energi rendah, mampu menyerap kadar air dengan mudah, dan kandungan air yang tinggi (Hidayat *et al.*, 2022; Rubiyanti *et al.*, 2019). Untuk mengatasi sebagian besar masalah yang berkaitan dengan kualitas biomassa sebagai bahan bakar dapat melalui proses torefaksi (Wahyudi *et al.*, 2020).

Beberapa penelitian mengenai torefaksi dengan bahan pelet biomassa telah dilakukan. Na *et al.* (2013) melakukan penelitian mengenai torefaksi serat mesokarp kelapa sawit dan pengaruhnya terhadap pembuatan pelet, mendapatkan hasil kandungan karbon dalam biomassa torefaksi meningkat dari 48,02% menjadi 54,83%. Nilai energi biomassa torefaksi meningkat sebesar 5 – 19% bila dibandingkan dengan biomassa yang tidak diolah. Oleh karena itu, pelet biomassa yang dihasilkan melalui torefaksi mempunyai kualitas yang jauh lebih baik dibandingkan dengan pelet biomassa kontrol (Setkit *et al.*, 2021). Tambunan *et al.* (2023) mengkaji torefaksi bambu andong menggunakan tungku listrik (*electric furnace*) pada suhu 200°C, 240°C, dan 280°C pada waktu 50 menit. Torefaksi mampu meningkatkan kualitas pelet (Sulistio *et al.*, 2020).

Berdasarkan uraian di atas, telah banyak bentuk peningkatan pelet biomassa dengan menggunakan jenis biomassa yang beragam. Namun, masih sedikit yang mengkaji pengaruh torefaksi kayu karet dan bambu betung menggunakan tungku pemanas (*muffle furnace*) sehingga penelitian ini mengkaji pengaruh kayu karet dan bambu betung menggunakan tungku pemanas (*muffle furnace*). Keunggulan menggunakan tungku pemanas yaitu sumber panas dapat dengan mudah dikontrol pada saat pemakaian, sehingga memungkinkan proses pemanasan yang konsisten dan seragam (Dreyer *et al.*, 2021).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh suhu dan durasi torefaksi terhadap sifat energi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai alternatif bioenergi.
2. Bagaimana perbandingan kualitas produk yang dihasilkan dari proses torefaksi antara pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai alternatif bioenergi.

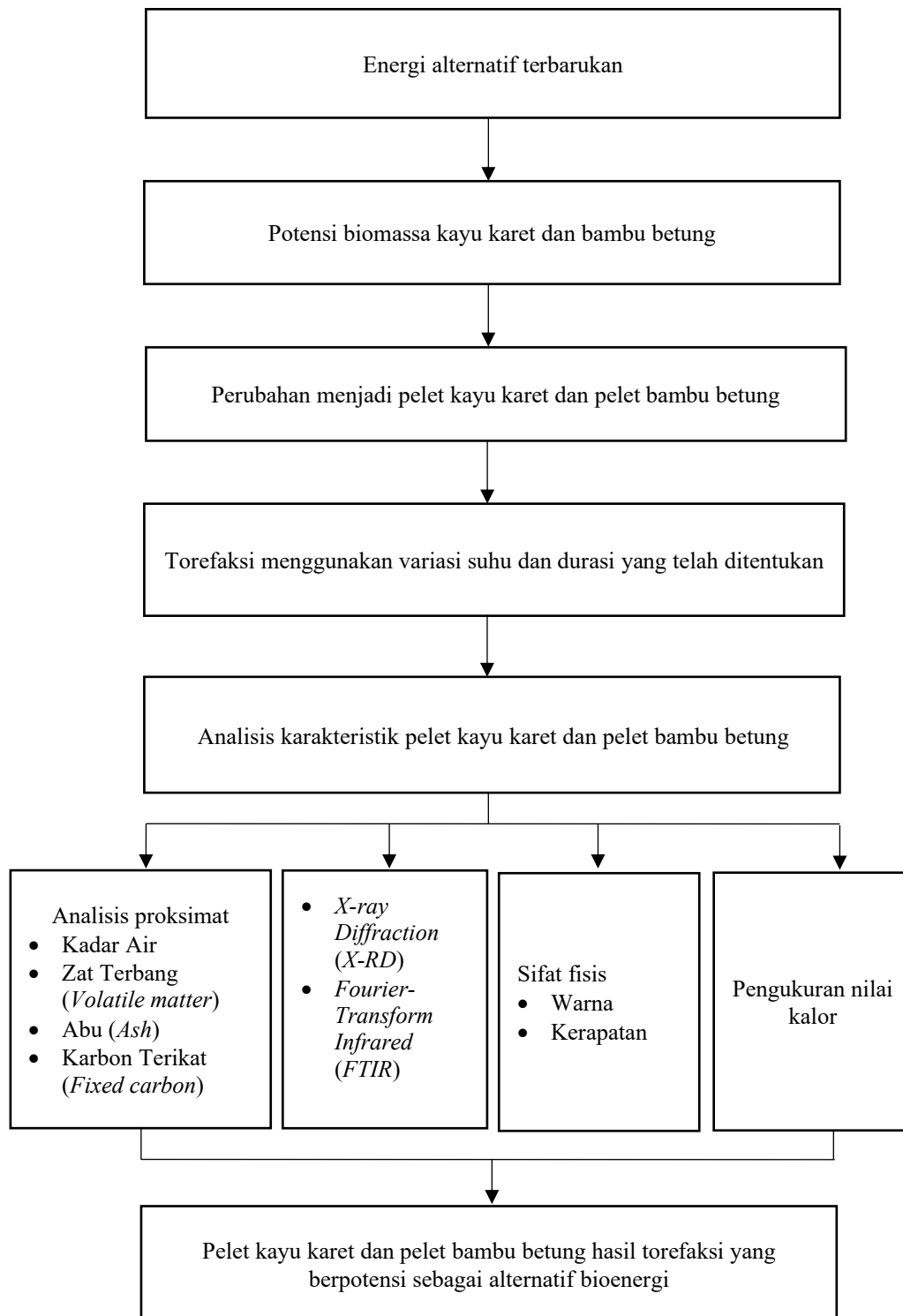
1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh suhu dan durasi torefaksi terhadap sifat energi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai alternatif bioenergi.
2. Mengetahui perbandingan kualitas produk yang dihasilkan dari proses torefaksi antara pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai alternatif bioenergi.

1.4 Kerangka Penelitian

Bertambahnya jumlah penduduk dunia ini berdampak pada peningkatan penggunaan energi fosil. Sehingga ketersediaan bahan bakar tidak terbarukan ini semakin menipis, maka diperlukan energi alternatif yang berasal dari biomassa. Kayu karet dan bambu betung berpotensi sebagai sumber energi terbarukan dengan proses densifikasi menjadi pelet. Namun, pelet biomassa memiliki kekurangan, yaitu nilai energi rendah, mampu menyerap kadar air dengan mudah, dan kandungan air yang tinggi, untuk meningkatkan karakteristik dari pelet kayu tersebut, maka diperlukannya proses torefaksi. Torefaksi menggunakan *muffle furnace* (MF) merupakan sebuah metode dengan menggunakan suhu yang rendah (200°C - 300°C) dengan oksigen yang terbatas untuk mendapatkan nilai kalor dan karakteristik pelet kayu.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Sumber energi dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu energi konvensional dan energi alternatif. Energi konvensional, merupakan energi yang berasal dari sumber daya yang sangat terbatas di bumi dan tidak dapat diperbarui, seperti bahan bakar fosil. Biomassa adalah bahan organik yang dapat terurai yang diperoleh dari tanaman atau hewan yang dapat diakses secara terbarukan, oleh karena itu, "biomassa" adalah konsep untuk semua bahan organik yang berasal dari pohon, tanaman, dan tanaman pangan, yang pada dasarnya adalah penangkapan dan penyimpanan energi matahari melalui fotosintesis (Ridhuan dan Suranto, 2017). Dalam konteks produksi bioenergi, biomassa sering merujuk pada bahan-bahan berbasis tanaman yang dihasilkan dari fotosintesis, yang mengubah CO₂, air dan sinar matahari menjadi bahan organik dan menyimpan energi matahari dalam ikatan kimia (Okopi *et al.*, 2024). Biomassa dapat diperoleh langsung dari tanah, seperti dari bahan tanaman yang ditanam khusus untuk tenaga atau dari residu yang tersisa setelah tanaman pangan diproses untuk makanan atau penggunaan lain (Kiehbardroudezhad *et al.*, 2023). Tentu saja, tanaman ditanam melalui reaksi fotosintesis, menjadikan biomassa bersih dan berkelanjutan sumber energi (Tumpu *et al.*, 2022). Sumber daya biomassa meliputi limbah pertanian beserta produk lignoselulosa, limbah kayu, tanaman air, sampah perkotaan, dan limbah rumah tangga (Mishra *et al.*, 2019).

Biomassa dianggap sebagai jenis sumber energi "hijau" yang khas dan menjanjikan. Biomassa ditemukan melimpah di alam dan dapat dengan mudah dihasilkan di sebagian besar lingkungan non-perkotaan. Biomassa juga biasanya disebut sebagai bahan bakar 'karbon netral' karena biomassa adalah bagian dari bio-siklus. Oleh karena itu, biomassa dapat dikatakan sebagai bahan berkelanjutan

yang dapat menghasilkan emisi karbon bersih yang jauh lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil (Chew dan Doshi, 2011). Sumber daya biomassa dapat dibagi menjadi tiga kategori (Okopi *et al.*, 2024). Pertama, limbah produksi pertanian, sisa pertanian, limbah pengolahan pertanian, limbah organik, perkotaan, limbah kayu perkotaan, dan limbah kayu pabrik. Kedua, hasil hutan, termasuk kayu, pohon, semak dan sisa kayu, sisa penebangan, serbuk gergaji, kulit kayu, dan sebagainya dari pembukaan hutan. Ketiga, tanaman energi, termasuk pati (jagung, gandum dan jelai), tanaman gula (tebu dan bit), tanaman biji minyak (kedelai, bunga matahari, bunga matahari), tanaman berkayu rotasi pendek, dan tanaman berkayu herba (Ozturk *et al.*, 2017).

Indonesia memiliki potensi biomassa sekitar 146,7 juta ton/tahun atau setara dengan 470 GJ/tahun (Rhofita *et al.*, 2022). Tingginya potensi biomassa untuk menjadi pasokan energi global dapat semakin mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, yang jumlahnya semakin berkurang selama bertahun-tahun (Dhanasekar dan Sathyanathan, 2023). Biomassa menjadi sumber energi keempat yang paling banyak dikonsumsi di dunia, setelah tiga sumber energi konvensional, yaitu minyak fosil, batu bara, dan gas alam. Biomassa menyumbang 14% dari konsumsi energi primer dunia (Haarlemmer *et al.*, 2016). Biomassa dapat dikonversi menjadi energi melalui berbagai metode proses. Pemilihan teknologi konversi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis dan jumlah biomassa, bentuk energi yang diinginkan, kebutuhan pengguna, standar lingkungan serta kondisi ekonomi (Solihat *et al.*, 2024).

Dalam penggunaan biomassa dapat dibagi menjadi dua, yaitu biomassa modern dan biomassa tradisional (Pratiwi *et al.*, 2024). Biomassa tradisional merupakan sumber energi utama di banyak negara berkembang, contoh biomassa tradisional meliputi kayu bakar, produk sampingan pertanian, dan kotoran yang dibakar untuk keperluan memasak dan memanaskan (Asresu, 2017). Pada umumnya pengelolaan biomassa tradisional dilakukan secara tidak berkelanjutan karena pengambilan bahan baku tidak diimbangi dengan penanaman secara berkelanjutan. Biomassa yang diproduksi dengan cara berkelanjutan disebut biomassa modern. Pembakaran bahan bakar biomassa padat, cair, gas akan menghasilkan energi yang dapat digunakan pada skala industri. Biomassa modern dilakukan dengan cara konversi

biomassa menjadi suatu produk dan dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar atau bioenergi. Berikut merupakan perbedaan biomassa tradisional dan biomassa modern yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan Biomassa Tradisional dan Biomassa Modern

No	Keterangan	Biomassa Tradisional	Biomassa Modern
1.	Lingkungan	Mengeluarkan sisa pembakaran seperti akan, yang berdampak pada emisi GRK	Berkontribusi dalam pengurangan emisi GRK, karena terdapat pergantian dengan cara budidaya
2	Teknologi	Pembakaran secara langsung	Torefaksi, pirolisis, gasifikasi
3	Konversi	Rendah	Tinggi
4	Efisiensi konversi energi	Abu	Pelet, biogas, biofuel, bioetanol
5	Produk sampingan	Negara berkembang dan rumah tangga	Negara maju dan industri
6	Konsumen	Berkontribusi rendah	Berkontribusi tinggi

Sumber : (Gurung dan Oh, 2013).

Biomassa berperan sebagai energi terbarukan yang melimpah dan potensial di seluruh dunia (He *et al.*, 2024). Biomassa saat ini menyumbang sekitar 10% energi primer yang digunakan secara global, menjadikannya sumber energi terbarukan yang (Tolessa, 2023). Biomassa biasanya terdiri dari karbohidrat, lemak, protein, dan beberapa mineral yang jumlahnya sedikit seperti sodium, fosfor, kalsium, dan besi. Komponen utama biomassa tanaman adalah karbohidrat (sekitar 75% berat kering), lignin (kurang lebih 25%), dan komposisinya dapat berbeda dari tanaman ke tanaman. Penggunaan biomassa sebagai sumber bahan bakar sangat menguntungkan dari aspek keberlanjutannya karena lebih dari 140 juta ton matrik biomassa digunakan pertahun (Ridhuan dan Suranto, 2017). Biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar umumnya memiliki nilai ekonomis rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk utamanya.

Sumber energi biomassa mempunyai beberapa kelebihan antara lain merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*), karena berasal dari tanaman, yang menyimpan energi matahari. Sejumlah besar organisme mati setiap tahun, dan pada saat yang sama, banyak organisme baru tumbuh, sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan (*sustainable*) (Parinduri dan Parinduri, 2020). Biomassa dapat menjadi sumber energi yang ramah lingkungan, menunjukkan polusi rendah karena kandungan sulfur dan nitrogennya yang rendah, jumlah karbon dioksida yang dikonsumsi ketika biomassa tumbuh setara dengan

jumlah karbon dioksida yang dilepaskan selama produksi dan pembakarannya dengan demikian, proses pertumbuhan dan pembakarannya dapat mencapai emisi karbon dioksida nol (Cao *et al.*, 2017). Biomassa bersifat universal dan mudah diperoleh dari laut dan daratan, termasuk dataran dan pegunungan. Oleh karena itu, pengembangan energi biomassa relatif lebih diminati dibandingkan energi terbarukan lainnya, seperti energi surya, angin, panas bumi, dan pasang surut di seluruh dunia (Durak dan Aysu, 2016). Tingginya potensi biomassa untuk menjadi pasokan energi global bisa menjadi alternatif penggunaan bahan bakar fosil, yang telah menurun selama ini bertahun-tahun (Dhanasekar dan Sathyanathan, 2023).

2.2 Bioenergi

Bioenergi adalah energi kimia yang tersimpan dalam bahan organik, yang dapat langsung diubah menjadi sumber energi yang berguna melalui proses biologis, mekanis, atau termokimia (Lopez *et al.*, 2014). Bioenergi dapat diperoleh dari fraksi produk biodegradasi, limbah, residu industri pertanian dan kehutanan, serta dari sebagian kecil biodegradasi limbah industri dan perkotaan (Nasser dan Setiawan, 2021). Sebagian besar energi yang digunakan pada saat ini berasal dari sumber daya berbasis fosil yang tidak terbarukan, misalnya solar, batu bara, dan gas alam. Namun, ketergantungan pada sumber daya ini dalam jangka panjang menyebabkan sumber daya tersebut cepat habis. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang besar, dampaknya akan meningkatkan suhu rata-rata global dan mengakibatkan isu perubahan iklim yang mengkhawatirkan (Gourich *et al.*, 2023).

Bioenergi mempunyai peran penting dalam mencapai tujuan penggantian minyak bumi sebagai bahan bakar transportasi dengan bahan bakar alternatif, serta penurunan emisi karbondioksida dalam jangka panjang (Nasser dan Setiawan, 2021). Bioenergi berfungsi sebagai jembatan transisi dari sistem energi yang berbasis sumber daya fosil ke sistem energi yang mengandalkan sumber daya terbarukan. Bioenergi juga merupakan komponen penting dan jalur strategis dalam upaya mencapai *Millenium Development Goals* (MDGs). Oleh karena itu, bioenergi merupakan salah satu sektor energi global yang paling dinamis dan berkembang pesat (Wattimena *et al.*, 2021).

Bioenergi terbagi dalam 4 bentuk utama, yaitu biomassa padat termasuk kayu, limbah pertanian, tanaman energi, dan perkebunan yang ditanam khusus untuk energi. Biomassa padat dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar di kompor, tungku, atau boiler. Untuk meningkatkan kenyamanan dan efisiensi energi, biomassa padat juga dapat diolah menjadi beberapa produk (Barot, 2022). Beberapa produk konversi biomassa yaitu biogas, seperti kotoran hewan, lumpur limbah, sisa makanan, atau tanaman energi, dapat dicerna secara anaerobik untuk menghasilkan biogas. Biogas menghasilkan kombinasi metana dan karbon dioksida sambil melarutkan molekul organik. Biogas dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, memanaskan bangunan, atau menggerakkan kendaraan (Abanades *et al.*, 2022). Bioetanol Fermentasi dan distilasi bahan baku biomassa yang mengandung banyak karbohidrat, seperti tebu, jagung, atau gandum, menghasilkan bioetanol, bahan bakar cair. Bioetanol dapat digunakan dalam transportasi sebagai bahan bakar tunggal atau dikombinasikan dengan bensin (Melendez *et al.*, 2022). Biodiesel merupakan bahan bakar yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar yang dapat dibuat dari hampir semua lemak atau minyak alami (Landwehr *et al.*, 2024).

Bioenergi dapat diproduksi dalam berbagai bentuk dari sumber biomassa, misalnya residu industri yang terdiri dari serat dan kayu, limbah tanaman dan pertanian; serta hutan dan pertanian, atau dikenal sebagai agroforestri. Semua residu ini dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, panas, gabungan produksi panas dan tenaga, serta berbagai bentuk bioenergi. Konversi teknologi yang efisien untuk aplikasi skala rumah tangga, usaha kecil dan industri adalah kunci menuju era bioenergi yang ingin dicapai. Saat ini, perlu untuk mengubah input biomassa padat atau cair menjadi energi yang lebih efisien, seperti biofuel padat (kayu bakar, serpihan kayu, pelet, batu bara, dan briket), biofuel berbentuk gas (hidrogen, biogas atau gas sintesis) dan biofuel cair (bioetanol dan biodiesel) (Sari dan Hadiyanto, 2013).

Pemanfaatan bioenergi dapat dibagi menjadi dua cara utama, metode biologis dan metode termokimia (Chen *et al.*, 2016). Metode biologis meliputi fermentasi, dan pencernaan, yang dapat mengubah biomassa menjadi bio-fuel berair atau gas. Pada metode ini, melibatkan penggunaan mikroorganisme (terutama jamur) untuk mendegradasi lignin dan hemiselulosa tetapi

membiarkan selulosa tetap utuh, meskipun perlakuan awal biologis melibatkan hal-hal ringan dengan kondisi dan biaya rendah, kerugiannya adalah, waktu pemrosesan dan hasil produk metode biologis relatif lama dan rendah (Chen *et al.*, 2021). Di sisi lain, metode termokimia lebih banyak diterapkan. Pendekatan termokimia dapat secara efisien mengubah biomassa menjadi bahan bakar atau bahan kimia dengan cara yang berkelanjutan dan sangat cepat (Zhang *et al.*, 2013). Teknologi konversi termokimia meliputi pembakaran langsung, torefaksi, pirolisis, gasifikasi, dan pencairan/karbonisasi hidrotermal, secara termal mengubah biomassa menjadi zat antara yang padat energi yang selanjutnya dapat diubah menjadi tenaga, dan juga bahan bakar cair. (Leng *et al.*, 2020).

Keunggulan bioenergi sangat banyak. Pertama, karena biomassa dapat dibudidayakan dan dipasok secara terus-menerus, bioenergi merupakan sumber energi terbarukan. Bioenergi membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan membantu mengurangi emisi gas rumah kaca. Bioenergi juga menyediakan solusi pengelolaan limbah dan mengurangi penggunaan tempat pembuangan akhir dengan memanfaatkan limbah dan residu organik. Selain itu, karena menggunakan sumber daya biomassa lokal dan dapat membuka peluang bisnis di industri pertanian dan kehutanan, bioenergi dapat mendukung pembangunan pedesaan dan penciptaan lapangan kerja (Ranjbari *et al.*, 2022; Slade *et al.*, 2011).

2.3 Densifikasi

Proses densifikasi adalah pemadatan biomassa melalui kompresi (penekanan) sehingga meningkatkan kepadatan massa atau potensi energinya. Densifikasi dilakukan pada biomassa karena energi spesifik alaminya rendah. Dalam keadaan alami (tanpa pengolahan) memerlukan biaya transportasi yang tinggi, memerlukan ruang penyimpanan yang besar dan sulit untuk ditangani (Rustamaji, 2012). *Biofuel* yang dipadatkan juga dapat diproduksi dari kayu kasar dan belum diproses bahan bukan kayu (misalnya kayu bulat, serpihan kayu, limbah dari pengelolaan kehutanan dan pertanian), dalam hal ini bahan mentah bahan baku perlu dilakukan pra-pemrosesan tambahan (misalnya, pengupasan kulit kayu, pemotongan,

pembersihan, penyortiran, pengurangan ukuran), yang menambahkan dengan biaya produk akhir (San *et al.*, 2022).

Proses densifikasi dilakukan pada bahan berbentuk curah atau memiliki sifat fisik yang tidak beraturan. Terdapat tiga tipe proses densifikasi, yaitu ekstrusi (*extruding*), briket (*briquetting*), dan pelet (*pelleting*) (Gilvari *et al.*, 2019). Pada proses *extruding*, bahan dimampatkan menggunakan sebuah ulir (*screw*) atau piston yang melewati dies sehingga menghasilkan produk yang kompak dan padat. Proses *briquetting* menghasilkan produk berbentuk seperti tabung dengan ukuran diameter dan tinggi yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Proses *pelleting* terjadi karena adanya aliran bahan dari roll yang berputar disertai dengan tekanan menuju lubang-lubang dies pencetak pelet kayu

Tekanan, suhu, dan waktu retensi menjadi komponen utama dalam proses pemadatan yang mempengaruhi kualitas produk biomassa padat (Gong *et al.*, 2023). Pada tahap awal pemadatan, tekanan meningkat dan partikel biomassa tersusun ulang untuk membentuk kemasan rapat, mengeluarkan udara di pori-pori di antara partikel (Zhang *et al.*, 2020). Suhu juga memainkan peran penting dalam mempengaruhi kualitas produk yang dipadatkan. Suhu biomassa biasanya meningkat selama proses pemadatan untuk mengaktifkan pengikat yang melekat dan memfasilitasi deformasi plastik partikel termoplastik, yang mendorong ikatan produk yang dipadatkan (Arman dan Munira, 2019). Kualitas produk yang dipadatkan juga dipengaruhi oleh waktu retensi bahan biomassa dalam peralatan pemadatan. Waktu retensi menentukan tingkat kompresi biomassa, yang terkait dengan tekanan dan suhu pemadatan. Peningkatan waktu retensi dapat meningkatkan kepadatan dan daya tahan produk yang dipadatkan (Gong *et al.*, 2023).

Densifikasi produk memungkinkan biomassa torefaksi diubah menjadi pembawa energi yang nyaman dalam hal transportasi, penyimpanan dan penanganan karena bentuk dan ukurannya yang seragam (Chew dan Doshi, 2011). Densifikasi biomassa umumnya memiliki beberapa keuntungan, hal ini termasuk meningkatkan nilai kalor per satuan volume, memudahkan penyimpanan dan transportasi, serta menghasilkan ukuran dan kualitas yang seragam (Anderson *et al.*, 2017).

2.4 Pelet Kayu

Pelet kayu adalah potongan silinder kecil sepanjang 1-3 cm dengan diameter bervariasi dari 0,5 hingga 2 cm (Bacunawa dan Perido, 2024). Pelet kayu menjadi salah satu sumber energi alternatif dan ketersediaan bahan bakunya sangat mudah didapat. Pelet kayu merupakan salah satu produk yang dikembangkan sebagai sumber energi alternatif baru yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Pelet kayu terbuat dari serutan, serbuk gergaji, serpihan, lempengan, atau bahan lainnya. Kayu digiling, dihaluskan, atau dipecah dengan cara mekanis lain menjadi partikel kecil seukuran butiran. Proses ini juga mencakup mekanisme pengeringan untuk mengurangi kadar air berlebih dari 50% atau lebih dalam bahan mentah menjadi sekitar 10% (Hubbard, 2015). Limbah yang diolah menjadi suatu produk dapat menghasilkan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Produksi pelet dari limbah kayu merupakan salah satu sumber energi alternatif yang mampu memenuhi kebutuhan energi masyarakat. Bahan baku pelet dapat berupa kayu atau bahan lain yang merupakan bahan berlignin dan berselulosa (Alpian dan Supriyati, 2019).

Proses produksi pelet kayu berlangsung dalam 5 tahapan yaitu: perlakuan awal bahan baku (*pretreatment*), pengeringan, pengecilan ukuran, pencetakan wood pellet (*pelletizing*) dan pendinginan (*cooling*). Pelet kayu dapat dimanfaatkan untuk keperluan rumah tangga, pertanian, dan usaha besar, termasuk untuk sektor produksi energi seperti pembangkit tenaga listrik (Kementrian Kehutanan \Republik Indonesia, 2010). Pelet kayu dapat menjadi bahan bakar andalan karena mengandung nilai kalor yang tinggi dan dapat menghemat penggunaan bahan bakar fosil yang harganya semakin tinggi serta jumlahnya semakin menipis di Indonesia (Adrian *et al.*, 2015). Di sisi lain, energi dikonsumsi dalam proses pengeringan dan penggilingan kulit kayu untuk membuat pelet kayu. Oleh karena itu, pelet kayu memiliki rasio energi keluaran terhadap energi masukan yang lebih kecil daripada serpihan kayu; namun, pelet kayu dapat digunakan di rumah-rumah tinggal untuk dibakar secara efisien dalam tungku yang relatif kecil. Efisiensi energi sistem produksi pelet kayu harus ditingkatkan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) mereka untuk memperluas penggunaan pelet kayu sebagai sumber energi utama (Kayo *et al.*, 2014).

Terdapat berbagai standar kualitas pelet kayu, namun secara umum pada saat proses pembuat pelet kayu harus mengikuti standar umum. Seperti kadar air, kepadatan, ukuran, dan kadar abu (Wibowo dan Pari, 2022). Pelet kayu di Indonesia mempunyai standar mutu tersendiri yang dijadikan sebagai tolak ukur minimum pelet kayu yang diproduksi. Standar ini dikenal dengan SNI (Standar Nasional Indonesia) pelet kayu dapat di lihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar Mutu Pelet Kayu Berdasarkan SNI 8675:2018

No	Parameter	Satuan	Persyaratan
1.	Kerapatan	g/cm ³	Min. 0,8
2.	Kadar Air	%	Maks. 12
2.	Kadar abu	%	Maks. 5
3.	Zat yang mudah menguap/bagian yang hilang	%	Maks. 80
4.	Kadar karbon	%	Min. 14
5.	Nilai kalor	MJ/kg	Min. 16,5

Sumber: BSN, (2018).

Pelet merupakan jenis bahan bakar yang lebih konsisten karena ukuran, bentuk, dan kadar airnya yang seragam. Pelet berkualitas tinggi meliputi pelet yang terbuat dari limbah penggergajian kayu (Silva *et al.*, 2021). Pelet tidak boleh diproduksi dari bahan daur ulang seperti kayu yang diolah atau dicat karena emisi dari pembakaran bahan jenis ini akan menghasilkan emisi beracun (Trojanowski dan Fthenakis, 2019). Secara umum peletisasi biomassa menjadi biopelet memiliki banyak keunggulan, seperti peningkatan nilai kalor per satuan volume, kemudahan penyimpanan dan pengangkutan, serta memiliki dimensi dan kualitas yang seragam sehingga memudahkan penggunaannya. Namun pelet kayu juga mempunyai beberapa kelemahan seperti biaya operasional yang tinggi, densitas yang rendah, kadar air yang tinggi dan mudanya kemampuan pelet dalam menyerap air disekitarnya (Lestari *et al.*, 2019).

2.5 Torefaksi

Torefaksi merupakan salah satu teknologi yang efektif menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik yang baik mendekati karakteristik batubara yakni nilai kalor meningkat, rasio atom hidrogen dengan karbon (H/C) dan oksigen dengan karbon (O/C) lebih rendah (Mangalla, 2022). Batubara umumnya mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari material biomassa berkisar 4.700 - 6.300 kal/g. Untuk meningkatkan nilai kalor dan mengurangi kadar air maka

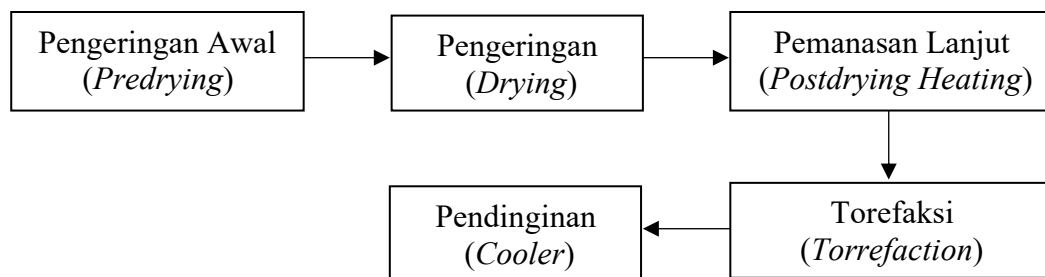
biomassa sering ditingkatkan mutunya melalui proses torefaksi (Suganal, 2019). Bahan bakar biomassa padat memiliki beberapa kelemahan seperti kadar serap air tinggi, nilai kalor yang rendah dan densitas energi rendah, sehingga aplikasinya terbatas, maka diperlukannya solusi dari masalah tersebut dengan dilakukannya torefaksi (Chen *et al.*, 2021). Torefaksi berasal dari bahasa Prancis “*torrefier*,” yang berarti memanggang, dan awalnya digunakan untuk menggambarkan proses memanggang biji kopi. Konsep torefaksi terkadang diartikan sebagai pemanggang, pra-perlakuan termal (Verma *et al.*, 2019). Torefaksi merupakan proses degradasi termal bahan organik pada temperatur 200°C - 300°C tanpa oksigen (Zakaria *et al.*, 2023). Torefaksi juga dapat disebut proses pirolisis ringan (*mild pyrolysis*) karena proses tersebut dilakukan pada kisaran suhu pirolisis lambat (Leong dan Chang, 2023). Torefaksi di atas suhu 300°C akan mengakibatkan devolatilisasi dan karbonisasi polimer yang luas, serta dapat kehilangan lignin dalam biomassa. Torefaksi sebenarnya adalah proses pra-perlakuan biomassa untuk meningkatkan energi, penanganan logistik, dan kualitas penggilingan bahan baku dengan menghilangkan kelembaban dan senyawa yang mudah menguap, dan produk akhir disebut “*biomassa torrefied*,” yang secara kasar mengandung 60%–70% dari total massa dan sekitar 90% dari total energi biomassa mentah (Basu, 2018). Proses torefaksi ini menguraikan sebagian biomassa dan menghasilkan produk padat (disebut biomassa *torrefied* atau *char*) dengan kandungan karbon tinggi (Yu *et al.*, 2017).

Keunggulan torefaksi antara lain proses yang terjadi pada suhu dan tekanan yang relatif rendah serta efisiensi konversi energi yang cukup tinggi, sekitar 90%. Selain itu, torefaksi biomassa menghasilkan produk yang lebih rapuh, dengan kepadatan energi yang lebih tinggi, hidrofobik, dan lebih tahan terhadap serangan jamur dibandingkan biomassa mentah, sehingga lebih mudah untuk diangkut dan disimpan. Torefaksi mempengaruhi sifat fisik, kimia, mekanik, dan bioenergi biomassa sehingga meningkatkan nilai ekonomisnya (Chen *et al.*, 2015). Selain itu, torefaksi dapat meningkatkan hasil energi biomassa karena peningkatan kandungan karbon (Apriyanto dan Thohirin, 2022).

Torefaksi dapat menghasilkan biomassa dengan nilai kalor tinggi atau nilai kalor yang lebih tinggi sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku alternatif

untuk produksi energi selain bahan bakar fosil (Yu *et al.*, 2017). Torefaksi menjadi alternatif dalam pemanfaatan biomassa yang lebih efektif untuk menghasilkan solid fuel dengan proses termokimia. Tujuan utama torefaksi adalah untuk memaksimalkan hasil massa (*mass yield*) dan hasil energi (*energy yield*) dengan mengurangi rasio oksigen, hidrogen, dan karbon (Fernando dan Helwani, 2016).

Pada proses torefaksi, bagian biomassa yang kandungan energinya rendah dihilangkan, sehingga hanya bagian biomassa yang kandungan energinya tinggi saja yang tersisa di dalam biomassa. Air dan hemiselulosa adalah contoh komponen biomassa berenergi rendah. Proses ini dilakukan pada suhu rendah dan laju pemanasan rendah untuk menghilangkan zat mudah menguap dan kadar air, menghindari reaksi karbonisasi selain itu untuk meminimalkan rasio oksigen terhadap karbon (O/C) dan hidrogen terhadap karbon (H/C) produk sekaligus memaksimalkan energi dan hasil massa (Kongto *et al.*, 2021). Semua faktor ini akan meningkatkan jumlah energi yang dihasilkan oleh produk torefaksi saat dibakar dibandingkan dengan biomassa mentah dalam jumlah massa yang sama. Saat proses torefaksi, biomassa akan mengalami beberapa tahapan. Tahapan dari proses tersebut antara lain:



Sumber: Basu, (2018).

Gambar 2. Tahapan Proses Torefaksi

Dalam proses torefaksi bahan biomassa, terdapat tiga jenis fase: fase padat, gas, dan cair. Produk padat dari torefaksi biasanya dihasilkan, berkisar antara 50–90% berat biomassa mentah, tergantung pada jenis bahan biomassa dan parameter pemanasan. Fase gas bervariasi dari 10–40% berat biomassa mentah dan fase cair bervariasi dari 25–20%. Produk padatan torefaksi umumnya terbagi dalam tiga karakteristik, yaitu *mass yield*, densitas energi, serta *energy yield* (Putri, 2023). Pelet biomassa hasil torefaksi menghasilkan produk dengan kondisi fisik yang

lebih gelap, umumnya disebut pelet hitam (*black pellet*) yang mempunyai kualitas lebih baik dibandingkan pelet mentah (Nunes *et al.*, 2014).

2.6 Muffle Furnace (MF)

Terdapat banyak alat teknologi yang dapat digunakan untuk torefaksi, salah satunya yaitu *Muffle Furnace* (MF). MF merupakan tungku dengan berbahan bakar listrik yang berfungsi sebagai pelebur, perubah dan pemanas pada suatu sampel dengan menggunakan pemanas atau *heater* sebagai pembangkit energi panasnya (Fhadillah *et al.*, 2023). Muffle furnace merupakan salah satu jenis tanur listrik yang digunakan untuk membakar atau mengabukan sampel pada suhu tinggi, yang terkontrol secara presisi (Adejumo *et al.*, 2020).

Keunggulan menggunakan tungku listrik yaitu sumber panas dapat dengan mudah dikontrol pada saat pemakaian, bersifat *portable* atau dapat dipindahkan ke berbagai tempat (Dreyer *et al.*, 2021), *muffle furnace* mampu mencapai dan mempertahankan suhu tinggi hingga 1200°C serta memiliki pemanas mengelilingi ruang pembakaran dan suhu yang merata sehingga dalam pengujian analisis proksimat memiliki akurasi yang baik (Abadi, 2018).



Gambar 3. Bagian-Bagian Reaktor *Muffle Furnace*

2.7 Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*)

Karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan anggota genus *Hevea* dan famili Euphorbiaceae atau tanaman getah-getahan yang merupakan pohon kayu tropis berasal dari hutan amazon (Tarigan *et al.*, 2021). Kayu karet tumbuh baik di dataran rendah (0-200 mdpl) dan dapat juga tumbuh pada ketinggian 400-600 m dpl, namun pertumbuhannya lebih lambat, dengan pertumbuhan lingkaran batang sebesar 3-6 bulan lebih lambat, dan ini terjadi setiap kenaikan ketinggian 200 mdpl. Tanaman karet tumbuh baik di lingkungan tropis. Pada daerah antara 150 LS° dan 150 LU° merupakan daerah yang ideal untuk tanaman karet (Andrian *et al.*, 2014). Berikut merupakan taksonomi tanaman karet.

Kerajaan : Plantae
 Divisi : Spermatophyta
 Sub Divisi : Angiospermae
 Kelas : Dicotyledonae
 Bangsa : Euphorbiales
 Suku : Euphorbiaceae
 Marga : *Hevea*
 Jenis : *Hevea brasiliensis*



Sumber: Maria dan Junirianto, (2021).

Gambar 4. Kayu Karet

Kegiatan peremajaan karet umumnya dilakukan melalui penebangan. Peremajaan pada kayu karet umumnya dilakukan sebelum mencaai umur 30 tahun. Kondisi ini mengakibatkan kehilangan biomassa dan cadangan karbon yang cukup besar. Ditinjau dari sudut pandang pemanfaatan kayu karet sebagai bahan bakar, disimpulkan bahwa kayu karet dapat dijadikan hal yang menjanjikan sebagai sumber energi alternatif terbarukan. Selain itu, teknologi konversi seperti torefaksi, pirolisis, dan gasifikasi telah digunakan untuk menghasilkan energi dari biomassa kayu karet (Shaaban *et al.*, 2013). Potensi energi kayu karet bisa mencapai sekitar 68,61 juta gigajoule (GJ) per tahun atau 40,04 GJ per hektar per tahun (Ratnasingam *et al.*, 2015). Pemanfaatan kayu karet menjadi pelet biomassa dapat memberikan beberapa keunggulan dalam upaya diversifikasi energi berkelanjutan (Suripto *et al.*, 2023). Pada akhir masa sadap, kayu karet menjadi biomassa yang dapat dimanfaatkan dikarenakan mempunyai kandungan lignoselulosa yang tinggi. Lignoselulosa merupakan bagian senyawa organik yang mengandung lignin, selulosa dan hemiselulosa yang dapat diubah menjadi produk berbeda. Contohnya adalah bioetanol, biogas, minyak berbahan dasar biomassa (*bio-oil*), dan bioarang (Sutini *et al.*, 2019). Tanaman karet memiliki kandungan selulosa mencapai 42% dan hemiselulosa sekitar 21% (Admojo dan Setyawan, 2018). Kayu karet mempunyai sifat fisik dan mekanik yang baik serta termasuk dalam kelas kekuatan II setara dengan kayu dari hutan alam seperti ramin, perupuk, akasia, mahoni, pinus, meranti, durian, ketapang, keruing, sungkai, gerunggang dan nyatoh. (Sucahyono dan Sumarto, 2019).

2.8 Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*)

Bambu menempati urutan pertama dalam hal produksi hasil hutan non-kayu di Indonesia (Arsad, 2015). Menurut Badan Pusat Statistik (2022), Indonesia memproduksi bambu hingga 66,92 juta batang. Persebaran bambu betung meliputi wilayah beriklim tropis dan subtropis, seperti Indonesia, China, India, dan Jepang. Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) termasuk dalam genus *dendrocalamus* dari famili *poaceae* merupakan salah satu jenis bambu yang banyak dimanfaatkan di Indonesia. Bambu betung merupakan jenis bambu yang ditandai dengan pertumbuhan rumpun yang rapat dan tinggi batang mencapai 20-30 meter.

Pertumbuhan vegetatif yang cepat dan kemudahan pengolahannya menjadikan bambu sebagai produk potensial untuk berbagai aplikasi (Nugroho *et al.*, 2022). Bambu memiliki kecepatan yang cepat pertumbuhan, batang dapat dipanen dalam waktu 3–6 tahun, tergantung pada spesies, dibandingkan dengan kayu, yang membutuhkan waktu 15 kali lipat lebih lama untuk dipanen. Bambu dapat mencapai tinggi maksimal dalam waktu 4–6 bulan, dengan tingkat pertumbuhan harian sebesar 15–18 cm. Satu rumpun mungkin memiliki 40–50 batang, menghasilkan 10–20 batang setiap tahunnya. Bambu tumbuh lebih cepat dibandingkan tanaman lain seukurannya (Liese *et al.*, 2015).

Bambu sebagai salah satu hasil hutan bukan kayu mempunyai pemanfaatan yang tinggi. Mulai dari bidang kerajinan, *furniture*, konstruksi dan industri, hingga pemenuhan kebutuhan sosial dan budaya, bambu telah menunjukkan potensinya sebagai bahan baku yang serbaguna (Rizqi *et al.*, 2023). Di Indonesia, biomassa bambu secara tradisional telah dimanfaatkan sebagai sumber kayu bakar untuk menghasilkan panas dalam rumah tangga, terutama untuk memasak dan merebus air (Sharma *et al.*, 2018). Bambu dianggap sebagai sumber energi berkelanjutan dan terbarukan karena sifat bahan bakarnya yang efisien dan tingkat pertumbuhan yang cepat (Hidayat *et al.*, 2024).

Bambu betung memiliki diameter batang yang bervariasi antara 12-20 cm. Ketebalan dinding batang bisa mencapai 2 cm, sedangkan panjang ruas bisa mencapai 60 cm (Abdulah dan Sutiyono, 2019). Bambu betung dapat ditemukan pada ketinggian 157-304 mdpl dengan jenis tanah lempung dan lempung berliat, persebaran bambu betung di Provinsi Lampung dapat ditemukan di Tahura WAR (Sariani *et al.*, 2023). Berikut merupakan taksonomi bambu betung.

Kerajaan	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta
Kelas	: Liliopsida
Bangsa	: Poales
Suku	: Poaceae
Marga	: <i>Dendrocalamus</i>
Jenis	: <i>Dendrocalamus asper</i>



Sumber: Asmunandar *et al.* (2023)

Gambar 5. Bambu Betung

Dendrocalamus asper (bambu betung) kaya akan holoselulosa dan memiliki komposisi kimia yang terdiri selulosa antara 42,4% hingga 53,6%, lignin dari 19,8% hingga 26,6%, abu dari 1,24% hingga 3,77%, pentosan dari 1,24% hingga 3,77% dan silika. 0,1% sampai dengan 1,78% (Asmunandar *et al.*, 2023). Bambu betung memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dibandingkan bambu yang lain (Abdulah dan Sutiyono, 2019). Jumlah ekstraktif larut alkohol benzen bambu betung yang relatif lebih banyak daripada bambu lainnya seperti bambu Sero dapat menjamin bambu tersebut tahan terhadap serangan rayap. Bambu betung memiliki kekuatan tekan sejajar serat yang cukup tinggi dan bambu betung memiliki daya tahan yang lebih lama dibandingkan bambu lainnya (Hadjar *et al.*, 2020). Bambu mempunyai keunggulan antara lain dapat dipanen pada umur 3 tahun, batang lurus, kekuatan tinggi, mudah diolah, dan harga relatif murah. Sehingga tepat digunakan untuk energi alternatif (Yusuf *et al.*, 2018).

Bambu betung bisa diperbanyak dengan cara setek rhizom, setek buluh (batang), setek cabang, layering (cangkok dan runduk), dan kultur jaringan. Namun, Cara yang sering digunakan adalah dengan setek batang dan setek cabang. Perbanyak dengan menggunakan setek cabang mempunyai beberapa kelebihan diantaranya adalah dapat menghasilkan bahan tanaman yang cukup banyak, dan tidak memerlukan tempat yang luas (Sari *et al.*, 2016).

2.9 Energi Terbarukan

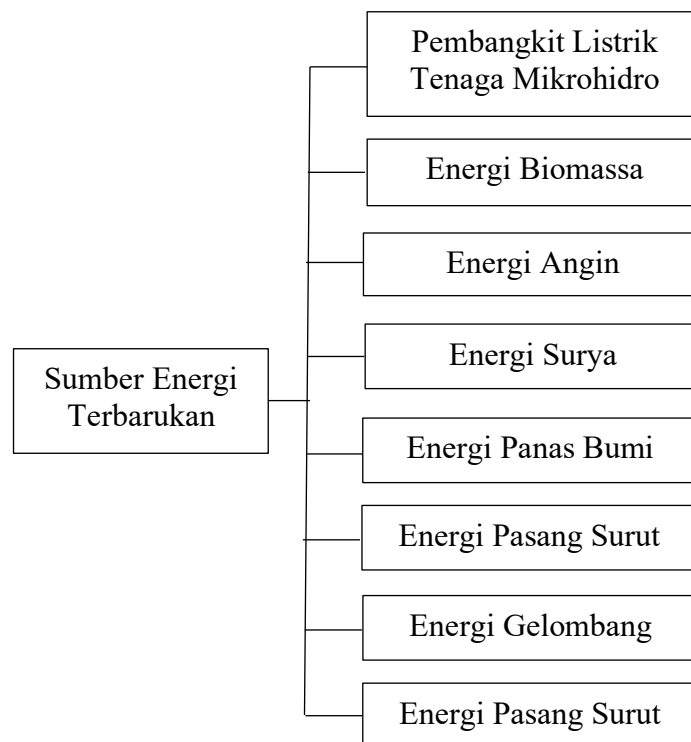
Energi memiliki peran penting bagi pertumbuhan ekonomi dan kemajuan sosial (Fu *et al.*, 2021). Aktivitas manusia, baik dalam skala domestik, industri, atau transportasi, sangat bergantung pada energi. Sumber energi utama saat ini adalah bahan bakar fosil yang tidak terbarukan. Meningkatnya permintaan energi global dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil telah memicu krisis energi. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil berdampak pada emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida, yang memperburuk pemanasan global (Parinduri dan Parinduri, 2020). Oleh karena itu, perlu adanya suplai dari energi alternatif selain minyak bumi dan batu bara.

Energi adalah kapasitas sistem fisik untuk melakukan kerja, atau sebagai alternatif, menghasilkan panas. Energi adalah karakteristik fisika suatu sistem. Energi terbarukan biasanya merujuk pada energi yang tidak mencemari lingkungan dan dapat didaur ulang di alam (Hubbard, 2015). Energi dianggap sebagai faktor untuk mencapai tujuan pembangunan sosial dan ekonomi suatu negara. Energi merupakan kebutuhan utama untuk meningkatkan nilai hidup masyarakat, karena energi terutama dibutuhkan untuk listrik, memasak, mendinginkan, memanaskan, dan memproduksi berbagai komoditas yang penting bagi kehidupan sehari-hari. (Deshmukh *et al.*, 2023).

Sumber energi merupakan sesuatu yang dapat menghasilkan energi, baik secara langsung ataupun melalui proses konversi atau transformasi. Sumber daya energi mengacu pada sumber daya alam yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi atau digunakan langsung sebagai energi (Afriyanti *et al.*, 2020). Bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam termasuk dalam kategori sumber energi tak terbarukan. Pembentukannya memerlukan waktu yang sangat lama dan penggunaannya yang berlebihan dapat menimbulkan kerusakan lingkungan serta krisis energi (Hamdi, 2016). Sumber energi primer merupakan energi yang berasal dari alam. Energi ini dapat diklasifikasikan menjadi energi konvensional dan energi terbarukan. Energi konvensional seperti minyak dan gas alam merupakan sumber daya alam yang terbatas dan tidak terbarukan. Penggunaan sumber daya tersebut secara terus-menerus tidak hanya menyebabkan kelangkaan energi, namun juga

menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan seperti perubahan iklim dan polusi.

Energi berkelanjutan adalah energi yang dihasilkan dari sumber-sumber alami dan tidak merusak lingkungan (Adams *et al.*, 2018; Yana *et al.*, 2022). Energi terbarukan merupakan alternatif untuk energi yang berasal dari bahan bakar fosil dan dapat digambarkan sebagai energi yang memiliki sedikit atau bahkan tidak menghasilkan emisi sama sekali (Abdallah, 2023). Sumber energi terbarukan adalah sumber daya alam yang dapat diperbarui dan memiliki jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan sumber energi konvensional. Ciri penting dari sistem energi berkelanjutan adalah kemampuan untuk menyediakan fasilitas yang dibutuhkan tanpa menghabiskan sumber daya. Pendekatan pertama untuk menciptakan strategi tersebut adalah meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya yang tersedia untuk memaksimalkan penggunaan sumber energi terbarukan. Klasifikasi energi terbarukan ditunjukkan pada Gambar 6 (Verma *et al.*, 2019).



Sumber: Marks *et al.* (2020).

Gambar 6. Klasifikasi Energi Terbarukan

Energi terbarukan dianggap sebagai cara terbaik untuk mengatasi pemanasan global dan perubahan iklim. Semakin banyak energi terbarukan yang kita gunakan, semakin sedikit bahan bakar fosil yang kita bakar, dan semakin sedikit pembakaran bahan bakar fosil berarti semakin sedikit emisi CO² dan semakin sedikit dampaknya terhadap perubahan iklim. Ada banyak alasan untuk memilih energi terbarukan daripada bahan bakar fosil (Verma *et al.*, 2019).

Sebagai negara dengan potensi energi terbarukan yang besar, Indonesia berupaya memanfaatkan potensi tersebut secara optimal untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional (Gumelar *et al.*, 2019). Dalam mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan tahun 2030, ketersediaan energi berkelanjutan telah menjadi fokus global. Pemerintah Indonesia telah merumuskan Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 yang bertujuan untuk meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan. Sesuai dengan peraturan yang berlaku, energi nasional ditargetkan dengan tujuan meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan menjadi 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Selain itu, penggunaan minyak bumi dan batubara dibatasi masing-masing sebesar 20% dan 25%. (Setyono *et al.*, 2019).

Beberapa keuntungan menggunakan energi terbarukan yaitu, energi terbarukan dapat menggantikan bahan bakar fosil dan nuklir, ramah lingkungan, biaya transportasi dan transmisi lebih rendah, dan dapat digunakan untuk skala kebutuhan apa pun (Tripathi *et al.*, 2016). Penggunaan energi terbarukan adalah sifatnya yang berkelanjutan dan tidak akan pernah habis. Energi terbarukan juga dapat memberikan manfaat ekonomi bagi banyak daerah regional, karena sebagian besar proyek berlokasi jauh dari pusat kota besar dan pinggiran kota besar, serta banyak keuntungan lainnya (Cloke *et al.*, 2017).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari-Mei 2025. Penyiapan bahan dan proses torefaksi dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Universitas Lampung. Pengujian sifat fisik dan proksimat dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis FTIR dilakukan di Laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Muffle Furnace*, *crucible porcelain* (30ml), tang *crucible*, jangka sorong digital skala 0,01 mm, timbangan listrik skala 0,0001 g, oven (BJPX - Summer, PT Innotech System, Jakarta, Indonesia), colorimeter (AMT507, Amtast, Qingdao, China). Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Pelet Kayu karet (*Hevea brasiliensis*) didapatkan dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) didapatkan dari PT Indokarya Global Jaya.

3.3 Metode Pengambilan Data

3.3.1 Penyaringan dan Penyortiran

Tujuan dari penyaringan pelet kayu karet dan bambu betung adalah untuk memisahkan pelet dengan debu dan serbuk sisa pelet. Penyortiran dilakukan berdasarkan panjang pelet yaitu 2-3 cm.

3.3.2 Proses Torefaksi menggunakan Reaktor MF

Pelet yang telah dilakukan penyaringan dan penyortiran dimasukkan ke dalam *crucible porcelain* dengan penutup. Pelet torefaksi dari setiap jenis disiapkan dalam 12 bar. Selanjutnya, *crucible porcelain* di letakkan ke dalam *muffle furnace*, dan dilakukan proses torefaksi menggunakan suhu 200°C, 250°C, dan 300°C dengan durasi 20, 30, dan 40 menit (Gambar 7).



Gambar 7. Proses Torefaksi Menggunakan MF

3.4 Analisis Karakteristik

3.4.1 Sifat fisis

Sifat fisis yang diuji dalam penelitian ini meliputi warna, kerapatan, dan kadar air.

a. Warna

Uji warna pelet biomassa dilakukan sebelum dan sesudah proses torefaksi. Pengukuran warna dilakukan berdasarkan kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), kromatisasi kuning/biru (b^*), dan perubahan warna keseluruhan (ΔE^*). Perubahan ΔE^* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Keterangan:

(ΔE^*) = perubahan warna akibat perlakuan panas

(ΔL^*) = Selisih nilai kecerahan (L^*) sebelum dan sesudah perlakuan panas

(Δa^*) = selisih nilai kromatisasi merah/hijau (a^*) sebelum dan sesudah pemanasan

(Δb^*) = selisih nilai kromatisasi kuning/biru (b^*) sebelum dan sesudah pemanasan.

Tabel 3. Klasifikasi Nilai Rentang Warna

No.	Nilai Klasifikasi	Keterangan
1.	$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$	Perubahan Dapat Diabaikan
2.	$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	Perubahan Warna Sedikit
3.	$1,3 < \Delta E^* \leq 3$	Perubahan Warna Nyata
4.	$3 < \Delta E^* \leq 6$	Perubahan Warna Besar
5.	$6 < \Delta E^* \leq 12$	Perubahan Warna Sangat Besar
6.	$\Delta E^* > 12$	Warna Berubah Total

Sumber: Valverde dan Moya, (2014).

b. Kerapatan

Kerapatan merupakan perbandingan antara massa dan volume. Untuk menghitungnya, pelet biomassa dikeringkan terlebih dahulu kemudian ditimbang dan diukur volumenya. Prosedur ini telah diatur dalam standar nasional (SNI 8021-2014) untuk memastikan hasil pengukuran yang akurat dan konsisten. Kerapatan pelet biomassa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$KR = \frac{m}{v}$$

Keterangan:

KR = kerapatan (g/cm^3)

m = massa pelet (g)

v = volume (cm^3)

c. Adsorpsi Uap Air

Adsorpsi uap air dilakukan pada suhu ruang selama 14 hari menggunakan rumus kadar air. Selama 14 hari, pelet ditimbang menggunakan timbangan elektrik dengan ketelitian 0,0001 g. Setiap perubahan berat pelet dihitung sebagai persentase perubahan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai maksimum persentase daya serap air pada setiap jenis pelet. Perhitungan kadar air dirumuskan sebagai berikut:

$$AUA = \frac{(BA - BKO)}{BA} \times 100\%$$

Keterangan:

AUA = adsorpsi uap air (%)

BA = berat awal (g)

BKO = berat kering oven (g)

d. Ketahanan terhadap perendaman air

Untuk menguji ketahanan air, pelet kayu dan pelet bambu betung direndam dalam air selama 1 menit, 1 jam, 6 jam, 12 jam dan 24 jam, kemudian dilihat perubahan fisik yang terjadi pada pelet biomassa.

3.4.2 Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan untuk menilai kualitas pembakaran pelet sebagai bahan bakar. Dengan menganalisis kadar zat yang mudah menguap (*volatile matter*), abu (*ash*), dan karbon terikat (*fixed carbon*), maka dapat mengetahui seberapa efisien pelet biomassa membakar dan melepaskan energi panas.

a. Kadar air

Prinsip penentuan kadar air adalah dengan menguapkan air bebas yang terdapat pada bahan dengan menggunakan energi panas hingga tercapai keseimbangan antara kadar air bahan dengan udara sekitar. Pengujian kadar air dilakukan sesuai standar SNI 8675:2018. Berat kering udara dan berat kering oven diukur untuk mengetahui kadar air sampel sebelum dan sesudah proses torefaksi. Kadar air (KA) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$KA = \frac{(BA - BKO)}{BA} \times 100\%$$

Keterangan:

KA = kadar air (%)

BA = berat awal (g)

BKO = berat kering oven (g)

b. Kadar abu

Kadar abu merupakan persentase kandungan mineral yang tidak menguap dan menjadi residu pada saat pembakaran. Analisa uji kadar abu mengacu sesuai standar SNI 8675-2018. Persamaan berikut menghitung kadar abu.

$$\text{Kadar abu} = \frac{\text{Berat abu (g)}}{\text{Berat sampel kering (g)}} \times 100\%$$

c. Kadar Zat Menguap

Kadar zat menguap atau *volatile matter* merupakan persentase kehilangan berat akibat pemanasan tanpa udara luar. Analisis bahan mudah menguap berdasarkan standar SNI 8675-2018. Dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kadar zat menguap} = \frac{B - C}{B} \times 100\%$$

Keterangan:

B = Berat sampel sebelum pemanasan (g)

C = Berat sampel setelah pemanasan pada suhu $(950 \pm 20) ^\circ\text{C}$ selama 7 menit (g)

d. Karbon Terikat

Karbon terikat adalah laju fraksi yang terkandung dalam sampel, tidak termasuk kelembapan kadar, kadar abu, dan fraksi zat mudah menguap. SNI 8675-2018 digunakan sebagai dasar untuk analisis karbon terikat. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung

$$\text{Karbon Terikat (\%)} = 100\% - (\text{Kadar air} + \text{kadar zat menguap} + \text{kadar abu}) \%$$

3.4.3 Nilai Kalor

Nilai kalor adalah panas yang dihasilkan ketika satu satuan massa bahan bakar mengalami pembakaran sempurna dengan air dalam bentuk uap, dan dinyatakan dalam megajoule per kilogram (MJ/kg). Analisis nilai kalor menggunakan persamaan berikut (Wahid *et al.*, 2017).

$$\text{HHV} = 15.8514 + 1.9293(\text{FC}/\text{VM}) + 0.0418(\text{VM}/\text{ASH}) + 0.1398(\text{ASH}/\text{FC}) + 0.0234t + 0.0082T$$

Keterangan:

t = *Residence time*

T = *Temperature*

3.4.4 Analisis FTIR

Spektroskopi FTIR merupakan teknik analisis yang menggunakan serapan radiasi inframerah untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam suatu sampel. Sampel yang akan dianalisis dengan FTIR dihaluskan terlebih dahulu dan dicampur dengan KBr. Campuran ini kemudian dipadatkan dan dianalisis menggunakan spektroskopi FTIR (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, United States). Kemudian dilihat gugus kimia yang terdapat pada setiap gelombang.

3.4.5 Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

XRD merupakan metode yang cepat untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi suatu material karena hanya memerlukan sampel yang sedikit dan data yang dihasilkan biasanya mudah diinterpretasi (Alderton, 2021). Karakteristik pelet kayu akan dilakukan dengan menggunakan XRD untuk menganalisis struktur kristalografi sampel pelet kayu yang amorf atau kristalin

3.4.6 Analisis Deskriptif Kuantitatif

Dalam statistik deskriptif menggunakan nilai *mean* (rata-rata), maksimum, minimum, dan standar deviasi untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik masing-masing variabel dalam penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah

1. Torefaksi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik pelet biomassa, seperti penurunan kerapatan, pelet kayu karet dan bambu betung kontrol kering udara sebesar $1,27 \text{ g/cm}^3$ dan $1,29 \text{ g/cm}^3$, menjadi $1,05 \text{ g/cm}^3$ dan $1,03 \text{ g/cm}^3$ setelah ditorefaksi. Pelet biomassa hasil torefaksi memberikan penurunan kadar air pada pelet biomassa kontrol, nilai kadar air pada pelet kayu karet sebesar 1,72% dan kadar air pelet bambu betung 1,92%. Pelet biomassa hasil torefaksi memberikan peningkatan pada analisis proksimat, terutama kenaikan nilai kalor, nilai kalor (kontrol) pelet kayu karet dan bambu betung sebesar 17,85 MJ/kg dan 16,82 MJ/kg, setelah dilakukan torefaksi nilai kalor pelet kayu karet dan bambu betung menjadi 26,85 MJ/kg dan 26,70 MJ/kg. Suhu 300°C dengan waktu tinggal 30 dan 40 menit memberikan dampak yang besar terhadap pelet biomassa. Pada uji ketahanan air, pelet torefaksi suhu 300°C tidak mengalami perubahan fisik setelah perendaman selama 24 jam. Perubahan warna (ΔE^*) pelet kayu karet dan pelet bambu betung yang berubah total menjadi berwarna hitam pada suhu 300°C . Nilai proksimat seperti kadar air, zat abu, zat mudah menguap, dan karbon terikat kedua pelet telah memenuhi SNI 8675:2018 pada suhu 300°C . Nilai kalor kedua pelet mengalami kenaikan yang signifikan selama kenaikan suhu dan lamanya waktu tinggal yang digunakan. Torefaksi menyebabkan perubahan gugus fungsi seperti gugus OH, C-H, C=O, C-O, dan C-O-C dengan analisis FTIR, sehingga setelah ditorefaksi pada analisis FTIR gelombang pada kedua jenis pelet mengalami perenggangan. Pada analisis XRD pelet biomassa kontrol memiliki struktur kristal yang dominan, setelah dilakukannya proses torefaksi menunjukkan

perubahan pada puncak difraksi semakin menumpul, menandakan semakin tinggi suhu dan lamanya durasi yang digunakan saat proses torefaksi menyebabkan perubahan struktur kristal menjadi amorf.

2. Perbandingan antara pelet kayu karet dan pelet bambu betung telah memenuhi bahwa kedua biopelet tersebut berpotensi sebagai sumber energi, hal ini dibuktikan pada nilai hasil analisis proksimat seperti kadar pada pelet kayu karet dan pelet bambu betung yang ditorefaksi sebesar 1,72% dan 1,92%, zat menguap 61,65% dan 67,61%, Kadar abu 1,02% dan 1,06%, serta karbon terikat 35,61% dan 29,42%. Nilai kalor pada pelet kayu karet dan bambu betung yang ditorefaksi sebesar 26,85 MJ/kg dan 26,70 MJ/kg. Hasil analisa proksimat ini telah memenuhi SNI 8675:2018, namun pelet kayu karet memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan pelet bambu betung, menjadikannya lebih unggul sebagai sumber bioenergi.

5.2 Saran

Perlu penelitian lebih lanjut menggunakan variasi jenis biomassa dengan menggunakan variasi alat torefaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, F. 2018. Design of a simple muffle furnace for temperature optimization in ash content analysis. *Jurnal Neutrino*, 10(2): 30-39.
- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmacilion, F., El Haj Assad, M., Hajilounezhad, T., Hmida, A., Rosen, M. A. 2022. A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas. *Energy Science & Engineering*, 10(2): 630–655.
- Abdallah, T. 2023. *Sustainable mass transit: Challenges And Opportunities In Urban Public Transportation*. Elsevier. United States, 243 hlm.
- Abdul Wahid, F. R. A., Saleh, S., Abdul Samad, N. A. F. 2017. Estimation of higher heating value of torrefied palm oil wastes from proximate analysis. *Energy Procedia*, 138: 307–312.
- Abdulah, L., Sutiyono, S. 2019. Model taper bambu betung (The Taper Model of *Dendrocalamus asper* Backer ex Heyne). *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 16(1): 47–57.
- Adams, S., Klobodu, E. K. M., Apio, A. 2018. Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. *Renewable Energy*, 125: 755–767.
- Adejumo, B., Obasa, P., Ogundiran. 2020. Development of a muffle furnace. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16: 94–103.
- Admojo, L., Setyawan, B. 2018. Potensi pemanfaatan lignoselulosa dari biomasa kayu karet (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.). *Warta Perkaratan*, 37(1): 39–50.
- Adrian, A., Sulaeman, R., Oktorini, Y. 2015. Karakteristik wood pellet dari limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis* muell. arg) sebagai alternatif sumber energi terbarukan. *JOM Faperta*, 2(2): 1-6.
- Afriyanti, Y., Sasana, H., Jalunggono, G. 2020. Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi konsumsi energi terbarukan di Indonesia. *Directory Journal of Economic*, 2(3): 865-884.
- Alfernando, O., Muis, L., Junaida, S., Ginting, M. K., Haviz, M. 2022. Analisis pengaruh waktu torefaksi terhadap kualitas biobriket dari cangkang kelapa sawit (*palm oil shell*). *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi*

Teknik, 21(2): 181–190.

Alpian, Y., Supriyati, W. 2019. Pembuatan pelet dari serbuk limbah kayu menggunakan alat pengempa dan cetak sederhana. *Agrienvi: Jurnal Ilmu Pertanian*, 13(2): 22–31.

Amani, Y., Aris, M. Z. 2023. Variasi temperatur torefaksi pengaruh terhadap karakteristik dan nilai kalor dari produk briket arang eceng gondok. *Jurnal Energi Elektrik*, 12(1): 14–18.

Anderson, J., Helwani, Z., Komalasari, K. 2017. Proses densifikasi pelepah sawit menggunakan gliserol sebagai filler menjadi bahan bakar padat. *Jom FTEKNIK*, 4(1): 1–4.

Andrian, A., Supriadi, S., Marpaung, P. 2014. Pengaruh ketinggian tempat dan kemiringan lereng terhadap produksi karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) di Kebun Hapesong PTPN III Tapanuli Selatan. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, 2(3): 981–989.

Apriyanto, A., Thohirin, M. 2022. Kaji eksperimental konversi biomassa sampah menjadi bahan bakar terbarukan menggunakan proses torefaksi. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 7(1): 42–52.

Arlianti, L. 2018. Bioetanol sebagai sumber green energy alternatif yang potensial di Indonesia. *Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknik*, 5(1): 16–22.

Arman, M., Makhsud, A., Aladin, A., Mustafiah, M., Majid, R. A. 2017. Produksi bahan bakar alternatif briket dari hasil pirolisis batubara dan limbah biomassa tongkol jagung. *Journal of Chemical Process Engineering*, 2(2): 16–21.

Arman, M., Munira, M. 2019. Produksi bahan bakar alternatif briket dari hasil pirolisis bahan batubara dan serbuk gergaji. *Journal Of Chemical Process Engineering*, 3(2): 27–32.

Arsad, E. 2015. Teknologi pengolahan dan manfaat bambu. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 7(1): 45–52.

Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., Yuliarningsih, R. 2023. Evaluasi pengaruh suhu dan waktu pirolisis biochar bambu betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1): 4760–4771.

Asresu, A. T. 2017. Biomass briquetting: Opportunities for the transformation of traditional biomass energy in Ethiopia. *Journal. Energy Technol. Policy*, 7(3): 46–54.

Bacunawa Jr, F. J., Perido-Pascua, A. S. 2024. Utilization of wood pellet for industrial use. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3): 2439–2441.

- Badan Pusat Statistik Indonesia. 2021. *Luas Tanaman Perkebunan Karet*.
- Badan Pusat Statistik Indonesia. 2022. *Luas Tanaman Perkebunan Karet*.
- Barot, S. 2022. Biomass and bioenergy: resources, conversion and application. *Renewable Energy for Sustainable Growth Assessment*, 243–262.
- Basu, P. 2018. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press. Cambridge, 425 hlm.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional), 2018. SNI 8675-2018: *Pelet Biomassa Untuk Energi*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bui, Q.-B., Grillet, A.-C., Tran, H.-D. 2017. A bamboo treatment procedure: Effects on the durability and mechanical performance. *Sustainability*, 9(9): 1444.
- Cahayanti, I., Wartini, N. M., Wrsiati, L. P. 2016. Pengaruh suhu dan waktu ekstraksi terhadap karakteristik pewarna alami buah pandan (*Pandanus tectorius*). *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*, 4(2252): 32–41.
- Cao, L., Zhang, C., Chen, H., Tsang, D. C. W., Luo, G., Zhang, S., Chen, J. 2017. Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects. *Bioresource Technology*, 245: 1184–1193.
- Chen, P., Xie, Q., Addy, M., Zhou, W., Liu, Y., Wang, Y., Cheng, Y., Li, K., Ruan, R. 2016. Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production. *Bioresource Technology*, 215: 163–172.
- Chen, W.-H., Lin, B.-J., Lin, Y.-Y., Chu, Y.-S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J.-S., Ho, S.-H., Culaba, A. B. 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82: 100887.
- Chen, W.-H., Liu, S.-H., Juang, T.-T., Tsai, C.-M., Zhuang, Y.-Q. 2015. Characterization of solid and liquid products from bamboo torrefaction. *Applied Energy*, 160: 829–835.
- 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.
- Chew, J. J., Doshi, V. 2011. Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 4212–4222.
- Chuchita, C., Karelius, K., Sari, M. R. 2022. Proses Torefaksi Dengan Metode Batch Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Bohr: Jurnal Cendekia Kimia*, 1(1): 1–12.

- Cloke, J., Mohr, A., Brown, E. 2017. Imagining renewable energy: Towards a Social Energy Systems approach to community renewable energy projects in the Global South. *Energy Research & Social Science*, 31: 263–272.
- Damayanti, R., Lusiana, N., Prasetyo, J. 2017. Studi pengaruh ukuran partikel dan penambahan perekat tapioka terhadap karakteristik biopelet dari kulit coklat (*Theobroma cacao L.*) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. *Teknotan: Jurnal Industri Teknologi Pertanian*, 11(1): 51–60.
- Deshmukh, M. K. G., Sameeroddin, M., Abdul, D., Abdul Sattar, M. 2023. Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today: Proceedings*, 80: 1756–1759.
- Dewi, R., Sumardi, S., Isnanto, R. 2023. Analysis of fixed carbon and volatile matter briquettes of pine sawdust and coconut shell waste. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14: 901–907.
- Dhanasekar, S., Sathyanathan, R. 2023. Bioenergy potential of *Chlorella vulgaris* under the influence of different light conditions in a bubble column photobioreactor. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(4): 789–804.
- Dirgantara, M., Cahyana, B. T., Suastika, K. G., Akbar, A. R. M. 2020. Effect of temperature and residence time torrefaction palm kernel shell on the calorific value and energy yield. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428(1): 12010.
- Dreyer, J. A. H., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., Kiil, S. 2021. Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*, 121: 103264.
- Duan, D., Zhang, Y., Lei, H., Villota, E., Ruan, R. 2019. Renewable jet-fuel range hydrocarbons production from co-pyrolysis of lignin and soapstock with the activated carbon catalyst. *Waste Management*, 88: 1–9.
- Durak, H., Aysu, T. 2016. Structural analysis of bio-oils from subcritical and supercritical hydrothermal liquefaction of *Datura stramonium L.* *The Journal of Supercritical Fluids*, 108: 123–135.
- Fernando, A. Q., Helwani, Z. 2016. Torefaksi tandan kosong sawit: pengaruh kondisi proses terhadap nilai kalor produk torefaksi. *FTEKNIK*, 3(2): 1–4.
- Fhadillah, F. A., Andang, A., Busaeri, N. 2023. Sistem kontrol suhu electric muffle furnace menggunakan sensor thermokopel type-k berbasis mikrokontroler arduino uno. *Journal of Energy and Electrical Engineering*, 4(2): 113–124.
- Fu, F. Y., Alharthi, M., Bhatti, Z., Sun, L., Rasul, F., Hanif, I., Iqbal, W. 2021. The

dynamic role of energy security, energy equity and environmental sustainability in the dilemma of emission reduction and economic growth. *Journal of Environmental Management*, 280: 111828.

Gilvari, H., de Jong, W., Schott, D. L. 2019. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors-A review. *Biomass and Bioenergy*, 120: 117–134.

Gong, C., Meng, X., Thygesen, L. G., Sheng, K., Pu, Y., Wang, L., Ragauskas, A., Zhang, X., Thomsen, S. T. 2023. The significance of biomass densification in biological-based biorefineries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183: 113520.

Gourich, W., Song, C. P., Qua, K. S., Chan, E.-S. 2023. The potential of palm bioenergy in achieving Malaysia's renewable energy target and climate ambition in line with the Paris Agreement. *Energy for Sustainable Development*, 76: 101296.

Gumelar, B. W., Widiastuti, I., Wijayanto, D. S. 2019. Pembelajaran energi terbarukan untuk sekolah dasar studi kasus di kabupaten Klaten. *JIPTEK: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Dan Kejuruan*, 11(1): 16–21.

Gurung, D. A., Oh, S.-E. 2013. Conversion of traditional biomass into modern bioenergy systems: A review in context to improve the energy situation in Nepal. *Renewable Energy*, 50: 206–213.

Haarlemmer, G., Guizani, C., Anouti, S., Déniel, M., Roubaud, A., Valin, S. 2016. Analysis and comparison of bio-oils obtained by hydrothermal liquefaction and fast pyrolysis of beech wood. *Fuel*, 174: 180–188.

Hadjar, N., Marwah, S., Sari, M., Bana, S., Uslinawati, Z., Pujirahayu, N., Setiawan, A. 2020. Jenis dan keanekaragaman serta pemanfaatan bambu oleh masyarakat kelurahan Tobimeita Kecamatan Nambo Kota Kendari. *Jurnal Kehutanan Indonesia Celebica*, 1(1): 53–63.

Hamdi. 2016. *Energi Terbarukan*. Kencana. Medan, 344 hlm.

Hariz, T. M. R., Santosa, I. A., Maulana, M. I. ., Marwanto, Prasetya, D., Hidayat, W., Lubis, M. A. R., Kim, N. H., Febrianto, F. 2021. Effects of Resin Content on the Characteristics of Bamboo Oriented Strand Board Prepared from Strands of Betung, Ampel, and Their Mixtures. *Jurnal Sylva Lestari*, 9(3): 454–465.

Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D. A., Triyono, S., Wisnu, F. K. 2021. Torréfaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1): 12047.

- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., Wu, K. 2024. From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186: 107271.
- Hidayat, W., Wijaya, B. A., Saputra, B., Rani, I. T., Kim, S., Lee, S., Yoo, J., Park, B. B., Suryanegara, L., Lubis, M. A. R. 2024. Torrefaction of bamboo pellets using a fixed counterflow multibaffle reactor for renewable energy applications. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(1): 169–188.
- Hidayat, W., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D. A., Haryanto, A., Yoo, J., Hasanudin, U. 2021 Effects of torrefaction using COMB dryer/pyrolizer on the properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and jabon (*Anthocephalus cadamba*) pellets. In *International Conference on Sustainable Biomass*, 2020: (209-213).
- Hidayat, W., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Haryanto, A. 2020. Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(2): 169-181.
- Hidayat, W., Pah, J. M., Suryanegara, L., Hasanudin, U., Haryanto, A., Wulandari, C. 2022. Production and Characterization of Andong Bamboo (*Gigantochloa pseudoarundinacea* (Steudel) Widjaja) Pellets from Various Stem Parts. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 11(4): 713-723.
- Homdoun, N., Uttaruan, J., Sasujit, K., Wongsiriumnau, T., Tippayawong, N. 2020. Characterization of torrefied biomass pellets from corncobs and rice husks for solid fuel production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(3): 118-128.
- Hubbard, W. G. 2015. *Bioenerg*. Academic Press. Cambridge, 71 hlm.
- Irawan, A., Riadz, T., Nurmalisa, N. 2015. Proses Torefaksi tandan kosong kelapa sawit untuk kandungan hemiselulosa dan uji kemampuan penyerapan air. *Reaktor*, 15(3): 190–194.
- Iryani, D. A., Rakaseri, I., Azhar, A., Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U. 2023. Thermogravimetric assessment for combustion characteristic of torrefied pellet biomass from agricultural solid waste. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1187(1): 012019.
- Iskandar, T., Rofiatin, U. 2017. Karakteristik biochar berdasarkan jenis biomassa dan parameter proses pyrolysis. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(1): 28–35.
- Jurczykova, T., Šárovec, O., Kačík, F., Hájková, K., Jurczyk, T., Hrčka, R. 2023. Chromophores' contribution to color changes of thermally modified tropical wood species. *Polymers*, 15(19): 4000.

- Kayo, C., Tojo, S., Iwaoka, M., Matsumoto, T. 2014. *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Academic Press. Cambridge, 399 hlm.
- Kementrian ESDM. 2018. *Direktorat Panas Bumi Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*.
- Kementrian Kehutanan Republik Indonesia. 2010. *Wood Pellet Sumber Energi Dari Limbah Kayu. Siaran Pers Nomor: S.108/PIK-1/2010*. Kepala Pusat, Jakarta.
- Kiehadroudzinezhad, M., Merabet, A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Ghenai, C. 2023. Environmental assessment of optimized renewable energy-based microgrids integrated desalination plant: considering human health, ecosystem quality, climate change, and resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11): 29888–29908.
- Kongto, P., Palamanit, A., Chaiprapat, S. Tippayawong, N. 2021. Enhancing the fuel properties of rubberwood biomass by moving bed torrefaction process for further applications. *Renewable Energy*, 170: 703–713.
- Landwehr, K. R., Mead-Hunter, R., O’Leary, R. A., Kicic, A., Mullins, B. J., Larcombe, A. N. 2024. The respiratory health effects of acute in vivo diesel and biodiesel exhaust in a mouse model. *Chemosphere*, 142621.
- Leng, S., Leng, L., Chen, L., Chen, J., Chen, J., Zhou, W. 2020. The effect of aqueous phase recirculation on hydrothermal liquefaction/carbonization of biomass: A review. *Bioresource Technology*, 318: 124081.
- Leong, Y. K., Chang, J.-S. 2023. Microalgae-based biochar production and applications: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 389: 129782.
- LF, K. D. L., Ratnani, R. D., Suwardiyono, S., Kholis, N. 2017. Pengaruh waktu dan suhu pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa sebagai upaya pemanfaatan limbah dengan suhu tinggi secara pirolisis. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 2(1): 32-38.
- Liese, W., Welling, J., Tang, T. K. H. 2015. Bamboo. In *Bamboo: the plant and its uses*. Springer. Berlin, 365 hlm.
- López-Bellido, L., Wery, J., López-Bellido, R. J. 2014. Energy crops: prospects in the context of sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 60, 1–12.
- Mafu, L. D., Neomagus, H. W. J. P., Everson, R. C., Carrier, M., Strydom, C. A., Bunt, J. R. 2016. Structural and chemical modifications of typical South African biomasses during torrefaction. *Bioresource Technology*, 202: 192–

197.

- Mangalla, L. K. 2022. Karakteristik produk torefaksi kayu jati dengan pemanas konveksi dalam media gas inert. *Ilmiah Teknik Mesin*, 14(1): 49–56.
- Maria, E., Junirianto, E. 2021. Sistem pendukung keputusan pemilihan bibit karet menggunakan metode topsiis. *Informatika Mulawarman: Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*, 16(1): 7.
- Marks-Bielska, R., Bielski, S., Pik, K., Kurowska, K. 2020. The importance of renewable energy sources in poland's energy mix. *Energies*, 13: 1–23.
- Mauritio, P., Duryat, M. R., Hidayat, W. 2022. Pengaruh variasi suhu torefaksi terhadap perubahan warna dan sifat fisik pelet kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). *Warta Rimba: Jurnal Ilmiah Kehutanan*, 10(5): 1-7.
- Melendez, J. R., Mátyás, B., Hena, S., Lowy, D. A., El Salous, A. 2022. Perspectives in the production of bioethanol: a review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160: 112260.
- Mishra, P., Krishnan, S., Rana, S., Singh, L., Sakinah, M., Ab Wahid, Z. 2019. Outlook of fermentative hydrogen production techniques: An overview of dark, photo and integrated dark-photo fermentative approach to biomass. *Energy Strategy Reviews*, 24: 27–37.
- Moroz, J. G., Lissel, S. L., Hagel, M. D. 2014. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. *Construction and Building Materials*, 61: 125–137.
- Mukhtar, H., Ullah, N., Younas, M., Feroze, N., Ali, N., Fatehizadeh, A., Rezakazemi, M. 2023. Torrefaction interpretation through morphological and chemical transformations of agro-waste to porous carbon-based biofuel. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 264: 115426.
- Murda, R. A., Maulana, S., Fatrawana, A., Mangurai, S. U. N. M., Muhamad, S., Hidayat, W., Bindar, Y. 2022. Changes in Chemical Composition of Betung Bamboo (*Dendrocalamus asper*) after Alkali Immersion Treatment under Various Immersion Times. *Jurnal Sylva Lestari*, 10(3): 358–371.
- Muzakky, A., Maulana, F. A., Rizqi, M. U. N., Rizqy, M. I., Khairil, A. S. 2025. Arang briket: alternatif energi yang ramah lingkungan. *Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Manajemen*, 3(2): 352–355.
- Na, B.-I., Kim, Y.-H., Lim, W.-S., Lee, S.-M., Lee, H.-W., Lee, J.-W. 2013. Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. *Biomass and Bioenergy*, 52: 159–165.

- Nasser, K. M., Setiawan, T. 2021. Pengolahan limbah sanitasi berbasis bio-energi dalam penataan kawasan hunian kumuh di Tanjung Duren Utara, Jakarta Barat. *Jurnal Sains, Teknologi, Urban, Perancangan, Arsitektur (Stupa)*, 3(2): 1849–1860.
- Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S. L. 2018. Karakteristik kimia biomassa untuk energi (chemical characteristics of biomass for energy). *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kayu Tropis*, 16(1): 44–51.
- Nugroho, N., Bahtiar, E. T., Lelono, A. B. 2022. Kekuatan bambu betung (*Dendrocalamus asper Backer ex K. Heyne*) menahan gaya normal tekanan dan tarikan. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 40(1): 37–48.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., Catalão, J. P. S. 2014. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 153–160.
- Okopi, S., Li, Y., Xu, F. 2024. *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (M. A. B. T.-E. of S. T.. Elsevier. Amsterdam.
- Önür, M. E., Ekinici, K., Civan, M., Bilgili, M. E., Yurdakul, S. 2023. Quality properties and torrefaction characteristics of pellets: rose oil distillation solid waste and red pine sawdust. *Sustainability*, 15(14): 10971.
- Oyebode, W. A., Ogunsuyi, H. O. 2021. Impact of torrefaction process temperature on the energy content and chemical composition of stool tree (*Alstonia congenisis Engl*) woody biomass. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4: 100115.
- Ozturk, M., Saba, N., Altay, V., Iqbal, R., Hakeem, K. R., Jawaid, M., Ibrahim, F. H. 2017. Biomass and bioenergy: An overview of the development potential in Turkey and Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79: 1285–1302.
- Paga, B. O., Reniana, R., Renjaa, J. C. 2024. Pengaruh variasi ukuran partikel terhadap laju pembakaran dan kerapatan massa pada biopelet biji buah merah. *Agritechnology*, 7(1): 26–33.
- Pah, J. M., Suryanegara, L., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Wulandari, C., Hidayat, W. 2021. Product characteristics from the torrefaction of bamboo pellets in oxidative atmosphere. In *International Conference on Sustainable Biomass*. Atlantis Press. 202: (85-189).
- Parinduri, L., Parinduri, T. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2): 88–92.
- Phanphanich, M., Mani, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2): 1246–

1253.

- Poletto, M., Zattera, A. J., Santana, R. M. C. 2012. Thermal decomposition of wood: kinetics and degradation mechanisms. *Bioresource Technology*, 126: 7–12.
- Prasojo, S. W., Iskandar, N., Muchammad, M. 2022. Analisis komposisi material berbahan eceng gondok terhadap karakteristik biopelet. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(4): 559–566.
- Pratiwi, I., Miarti, A., Setiorini, I. A., Kurniasari, D., Kusniawati, E. 2024. *Teknik Bioenergi*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia. Jambi.
- Putri, A. 2023. *Jenis jenis tumbuhan yang berpotensi sebagai sumber bahan bakar alternatif masa depan. Biologi terapan untuk masa depan dan kemajuan bangsa*. CV. Haura Utama. Sukabumi.
- Putri, M. I. D. W., Murda, R. A., Maulana, S., Octaviani, E. A., Sari, N. A., Hasibuan, M. M., Aulia, F., Hidayat, W. 2024. Hybrid Biopellets Characterization of Gamal Wood (*Gliricidia sepium*) and Robusta Coffee Husk at Various Compositions. *Jurnal Sylva Lestari*, 12(3): 595–609.
- Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., Bula-Silvera, A. 2024. Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*, 12: 101886.
- Rahman, W. A., Suri, I. F., Saputra, B., Febryano, I. G., Duryat, Hidayat, W. 2024. Optimizing Calliandra (*Calliandra calothyrsus*) Biomass Pellets: Impact of Particle Size and Bark Composition. *Global Forest Journal*, 2(2): 133-146.
- 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 effect of torefaction on the chemical properties of empty fruit bunch pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(1): 63-70.
- Rani, I. T., Yoo, J., Park, B. B., Hidayat, W., Wijaya, B. A., Lee, S., Kim, S., Choi, H., Chun, D., Im, H., Kim, S. 2023. Wood Pellet Driven-Biochar Characterization Produced at Different Targeted Pyrolysis Temperatures. *Jurnal Sylva Lestari*, 11(3): 558–571.
- Ranjbari, M., Esfandabadi, Z. S., Quatraro, F., Vatanparast, H., Lam, S. S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M. 2022. Biomass and organic waste potentials towards implementing circular bioeconomy platforms: A systematic bibliometric analysis. *Fuel*, 318: 123585.
- Ratnasingam, J., Ramasamy, G., Wai, L. T., Senin, A. L., Muttiah, N. 2015. The prospects of rubberwood biomass energy production in Malaysia. *BioResources*, 10(2): 2526–2548.

- Rhofita, E. I., Rachmat, R., Meyer, M., Montastruc, L. 2022. Mapping analysis of biomass residue valorization as the future green energy generation in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 354: 131667.
- Ridjayanti, S. M., Bazenet, R. A., Banuwa, I. S., Riniarti, M., Hidayat, W. 2023. Karakteristik Arang Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) yang Diproduksi Menggunakan Dua Tipe Tungku Pirolisis. *Jurnal Belantara*, 6(1): 12–22.
- Ridhuan, K., Suranto, J. 2017. Perbandingan pembakaran pirolisis dan karbonisasi pada biomassa kulit durian terhadap nilai kalori. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 5(1).
- Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Wijaya, B. A. 2025. The Influence of Pyrolysis Temperature and Dosage of Shorea Wood Biochar Produced on Soil Properties and Sengon (*Falcataria moluccana*) Seedling Biomass. *Menara Perkebunan*, 93(1): 57-67.
- Rizqi, H. D., Guntur, H. L., Putra, A. B. K., Kusumadewi, T. V., Nasution, A. H., Sinansari, P., Kurniawan, F. 2023. Kajian potensi bambu untuk mendukung penerapan co-firing pada pembangkit listrik jawa bali. *Sewagati*, 7(1): 85–90.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor counter-flow multi baffle (*COMB*). *Jurnal Sylva Lestari*, 7(3): 321–331.
- Rustamaji, H. 2012. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*, 3(2): 26–29.
- San Miguel, G., Sánchez, F., Pérez, A., Velasco, L. 2022. One-step torrefaction and densification of woody and herbaceous biomass feedstocks. *Renewable Energy*, 195: 825–840.
- Saputra, B., Tambunan, K. G. A., Suri, I. F., Febryano, I. G., Iswandar, D., Hidayat, W. 2022. Effects of torrefaction temperature on the characteristics of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 11(2): 339–353.
- Sari, D. A., Hadiyanto, H. 2013. Proses produksi bioenergi berbasis bioteknologi. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 2(3): 108–113.
- Sari, E., Indriyanto, I., Bintoro, A. 2016. Respon setek cabang bambu betung (*Dendrocalamus asper*) akibat pemberian asam indol butirrat (AIB). *Jurnal Sylva Lestari*, 4(2), 62–68.
- Setkit, N., Li, X., Yao, H., Worasuwanarak, N. 2021. Torrefaction behavior of hot-pressed pellets prepared from leucaena wood. *Bioresour. Technology*, 321: 124502.

- Setyono, J. S., Mardiansjah, F. H., Astuti, M. F. K. 2019. Potensi pengembangan energi baru dan energi terbarukan di Kota Semarang. *Jurnal Riptek*, 13(2): 177–186.
- Shaaban, A., Se, S.-M., Mitan, N. M. M., Dimin, M. F. 2013. Characterization of biochar derived from rubber wood sawdust through slow pyrolysis on surface porosities and functional groups. *Procedia Engineering*, 68: 365–371.
- Sharma, R., Wahono, J., Baral, H. 2018. Bamboo as an alternative bioenergy crop and powerful ally for land restoration in Indonesia. *Sustainability*, 10(12): 4367.
- Silva, J., Ferreira, A. C., Teixeira, S., Martins, L., Ferreira, E., Teixeira, J. C. 2021. Sawdust drying process in a large-scale pellets facility: An energy and exergy analysis. *Cleaner Environmental Systems*, 2: 100037.
- Simanjuntak, F. A., Wisnu, F. K., Telaumbanua, M., Haryanto, A. 2022. Pengaruh durasi penekanan dan ukuran partikel terhadap kualitas pelet serbuk gergaji. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 1(3): 349–360.
- Sinaga, W. M. P., Suryadi, S., Setiawan, A., Faisal, F., Sayuthi, M. 2024. karakteristik produk biopelet berbahan baku limbah kelapa muda hasil torefaksi menggunakan retort kiln untuk bahan bakar tungku pengrajin pandai besi. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, 8(2): 221–225.
- Siyal, A. A., Liu, Y., Mao, X., Ali, B., Husaain, S., Dai, J., Zhang, T., Fu, J., Liu, G. 2021. Characterization and quality analysis of wood pellets: effect of pelletization and torrefaction process variables on quality of pellets. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11: 1–17.
- Slade, R., Gross, R., Bauen, A. 2011. Estimating bio-energy resource potentials to 2050: learning from experience. *Energy & Environmental Science*, 4(8): 2645–2657.
- Solihat, N. N., Hidayat, A. F., Ilyas, R. A., Thiagamani, S. M. K., Azeele, N. I. W., Sari, F. P., Ismayati, M., Bakshi, M. I., Garba, Z. N., Hussin, M. H. 2024. Recent antibacterial agents from biomass derivatives: characteristics and applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 21–27.
- Sucahyono, A. E., Sumarto, H. 2019. Pemanfaatan cnc untuk produk kerajinan pada limbah kayu perkebunan. *Prosiding Seminar Nasional Industri Kerajinan Dan Batik*, 1(1): 1–13.
- Suganal, dan H. G. 2019. Biomassa Tertifaksi Dalam Bentuk Briket (Skala Laboratorium). *Teknologi Mineral Dan Batubara*, 15(1): 31–48.

- 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 . *Jurnal Sylva Lestari*, 8(1): 65–76.
- Suri, I., Hidayat, W., Febryano, I., Hilmanto, R., Hadida, R., Awandi, H. 2024. Pengaruh Modifikasi Panas Oil Heat Treatment terhadap Perubahan Warna dan Berat pada Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) dan Bambu Andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*). *MAKILA*, 18(1): 136-147.
- Suripto, H., Anwar, S., Hamid, A. 2023. Studi kelayakan produksi briket dari kayu karet dan sekam padi sebagai upaya diversifikasi energi berkelanjutan. *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, 4(1): 24–29.
- Sutini, S., Widiastuty, Y. R., Ramadhani, A. N. 2019. Hidrolisis lignoselulosa dari agricultural waste sebagai optimasi produksi fermentable sugar. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 3(2): 59–68.
- Suwito, A., Afisna, L. P., Windiarto, A., Mahesha, D. A., Yudanta, F. R., Zarhimsyah, R. 2022. Analisis komposisi biopellet sebagai energi baru terbarukan dari limbah kayu karet. *Al Jazari: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 7(2).
- Tambunan, K. G. A., Saputra, B., Suri, I. F., Febryano, I. G., Bintoro, A., Hidayat, W. 2023. Perubahan sifat fisis dan mekanis pelet bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinaceae*) setelah perlakuan torefaksi. *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(1): 11–20.
- Tarigan, R. A., Ramadhan, M., Kustini, R. 2021. Sistem pakar mendiagnosa penyakit pada tanaman (*Havea Brasiliensis* (karet) menggunakan metode certainty factor (CF). *Jurnal Cyber Tech*, 4(2): 1–14.
- Telaumbanua, M., Wisnu, F. K., Haryanto, A., Suharyatun, S., Wahyudi, A. 2022. Effect of torrefaction temperature on physical properties of biopellet from variant biomass waste. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 12(1): 81–87.
- Tolessa, A. 2023. Bioenergy potential from crop residue biomass resources in Ethiopia. *Heliyon*, 9(2): 1-13.
- Tripathi, L., Mishra, A. K., Dubey, A. K., Tripathi, C. B., Baredar, P. 2016. Renewable energy: An overview on its contribution in current energy scenario of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60: 226–233.
- Trojanowski, R., Fthenakis, V. 2019. Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103: 515–

528.

- Tumpu, M., Lopian, F. E. P., Pasanda, O. S. R., Muliawan, I. W., Indrayani, P., Yasa, I. G. M. 2022. *Energi Hijau*. Tohar Media. Makassar.
- Utama, R. C., Febryano, I. G., Herwanti, S., Hidayat, W. 2019. Saluran Pemasaran Kayu Gergajian Sengon (*Falcataria moluccana*) pada Industri Penggergajian Kayu Rakyat di Desa Sukamarga, Kecamatan Abung Tinggi, Kabupaten Lampung Utara. *Jurnal Sylva Lestari*, 7(2): 195–203.
- Valverde, J. C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. *Color Research & Application*, 39(5): 519–529.
- Verma, D., Fortunati, E., Jain, S., Zhang, X. 2019. *Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy: Construction, biomedical, and other industrial applications*. Woodhead Publishing. India, 532 hlm.
- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Pratiwi, W. Z., Dianratri, I. 2021. “Biopellet” as One of future promising biomassbased renewable energy: a review. *E3S Web of Conferences*, 317: 4029.
- Wahyudi, R., Amrul, A. 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): 1–8.
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M. 2020. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy Fuels*, 34(12): 15343–15354.
- Wattimena, C. M. A., Parera, L. R., Imlabla, W. N. 2021. Teknik budidaya beberapa jenis kayu penghasil bioenergi untuk menunjang produktifitas briket arang. *J-DEPACE (Journal of Dedication to Papua Community)*, 4(1): 39–58.
- Wibowo, S., Lestari, N. 2018. Effect of peanut shell torrefaction on qualities of the produced bio-pellet. *Reaktor*, 18(4): 183–193.
- Wibowo, S., Pari, G. 2022. Pengaruh penambahan tepung tapioka pada karakteristik pelet kayu dari limbah cabang kayu jati perhutani plus (JPP). *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 16(1): 50–63.
- Yana, S., Nelly, N., Radhiana, R., Ibrahim, N., Zubir, A. A., Zulfikar, T. M., Yulisma, A. 2022. Dampak ekspansi biomassa sebagai energi terbarukan: kasus energi terbarukan indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(4): 4036–4050.

- Yoshida, T., Kuroda, K., Kamikawa, D., Kubojima, Y., Nomura, T., Watada, H., Sano, T., Ohara, S. 2021. Water resistance of torrefied wood pellets prepared by different methods. *Energies*, 14(6): 1618.
- Yu, K. L., Lau, B. F., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W.-H., Ng, E. P., Chang, J.-S. 2017. Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresource Technology*, 246: 2–11.
- Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi changes in physical properties of oil palm empty fruit bunch pellets caused by torrefaction. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(2), 104–111.
- Yusuf, S., Syamani, F. A., Fatriasari, W. 2018. Review on bamboo utilization as biocomposites, pulp and bioenergy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 141(1): 12039.
- Zakaria, M. R., Farid, M. A. A., Andou, Y., Ramli, I., Hassan, M. A. 2023. Production of biochar and activated carbon from oil palm biomass: current status, prospects, and challenges. *Industrial Crops and Products*, 199: 116767.
- Zhang, X.-S., Yang, G.-X., Jiang, H., Liu, W.-J., Ding, H.-S. 2013. Mass production of chemicals from biomass-derived oil by directly atmospheric distillation coupled with co-pyrolysis. *Scientific Reports*, 3(1): 1120.
- Zhang, Y., Fu, W., Xu, P., Li, B., Jiang, B. 2020. 5 Properties and Conversion Technologies. In *Green Energy and Infrastructure: Securing a Sustainable Future*. CRC Press. Florida. 347 hlm.