

**PERBANDINGAN SIFAT FISIK, MEKANIK, DAN BIOENERGI PELET
TOREFAKSI DARI KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN SEKAM
PADI (*Oryza sativa* L.)**

(Skripsi)

Oleh

**BRYAN WAHYU PERMANA
2054151008**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PERBANDINGAN SIFAT FISIK, MEKANIK, DAN BIOENERGI PELET TOREFAKSI DARI KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN SEKAM PADI (*Oryza sativa* L.)

Oleh

BRYAN WAHYU PERMANA

Tingginya konsumsi energi fosil memicu peningkatan emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran. Salah satu teknologi yang dapat memanfaatkan limbah ini adalah pelet biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan pelet dan membandingkan hasilnya. Pelet biomassa ditingkatkan sifat-sifatnya dengan torefaksi pada suhu 200°C-300°C. Data yang diambil perubahan warna, ketahanan air, kuat tekan, kadar abu, zat yang mudah menguap, karbon tetap, FTIR, dan nilai kalor diamati. Perubahan warna (ΔE^*) dari kayu karet kering dan pelet sekam padi berubah total. Kadar air menurun setelah torefaksi dan memenuhi standar. Kepadatan kering udara dan kering oven menurun setelah ditorefaksi. Pelet yang ditorefaksi pada suhu 280°C menunjukkan ketahanan air terbaik. Kadar air menurun setelah torefaksi dan memenuhi standar. Kepadatan kering udara dan kering oven menurun dengan adanya perlakuan torefaksi. Pelet yang ditorefaksi pada suhu 280°C menyebabkan penurunan kuat tekan. Dengan perlakuan torefaksi, kadar abu dan karbon tetap masih menurun; sebaliknya, nilai zat mudah menguap meningkat hingga memenuhi standar. Pelet yang ditorefaksi menunjukkan nilai kalor tertinggi. Torefaksi menyebabkan perubahan gugus fungsi seperti gugus OH, C-H, N-H, C=O, P=O, dan C-O-C berdasarkan analisis FTIR. Nilai kalor adalah jumlah panas yang dihasilkan ketika sejumlah pelet biomassa dibakar. Panas ini merupakan reaksi eksotermik yang melibatkan senyawa hidrokarbon dan oksigen. Nilai kalor ditentukan oleh kenaikan suhu selama pembakaran pada pelet biomassa.

Kata kunci: pelet biomassa, torrefaksi, kayu karet, sekam padi

ABSTRACT

COMPARISON OF PHYSICAL, MECHANICAL, AND BIOENERGETIC PROPERTIES OF TORREFIED PELLETS FROM RUBBER WOOD (*Hevea brasiliensis*) AND RICE HUSK (*Oryza sativa* L.)

By

BRYAN WAHYU PERMANA

The high consumption of fossil energy triggers an increase in CO₂ emissions resulting from combustion. A technology that can utilize this waste is biomass pellets. This study aimed to analyzed the content of the pellets and compare the result. The biomass pellets improved the properties by torrefaction at 200°C–300°C. Data on color changes, water resistance, compressive strength, ash content, volatile matter, fixed carbon, FTIR, and calorific value were observed. The color change (ΔE^) of the dried rubber wood and rice husk pellets totally changed. The moisture content decreased after torrefaction and met the standard. Air-dry and oven-dry densities decreased after torrefaction treatment. Pellets that torrefied at 280 °C showed the best water resistance. The moisture content decreased after torrefaction and met the standard. Air-dry and oven-dry densities decreased with increasing felt temperature. Pellets torrefied at 280°C caused a decrease in compressive strength. With the torrefaction treatment, the ash content and carbon fixed still decreased; on the contrary, the volatile matter value increased to meet the standard. Pellets torrefied at 280°C showed the highest heating value. Torrefaction causes changes in functional groups such as OH, C-H, N-H, C=O, P=O, and C-O-C groups by FTIR analysis.*

Keywords: *biomass pellet, torrefaction, rubber wood, rice husk*

**PERBANDINGAN SIFAT FISIK, MEKANIK, DAN BIOENERGI PELET
TOREFAKSI DARI KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN SEKAM
PADI (*Oryza sativa* L.)**

Oleh

BRYAN WAHYU PERMANA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul : **PERBANDINGAN SIFAT FISIK, MEKANIK,
DAN BIOENERGI PELET TOREFAKSI
DARI KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)
DAN SEKAM PADI (*Oryza sativa* L.)**

Nama Mahasiswa : **Bryan Wahyu Permana**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2054151008**

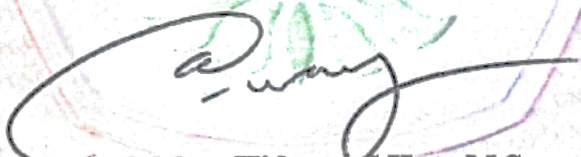
Jurusan : **Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**

Tanggal Pengajuan : **10 Juni 2024**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.
NIP 19790107200811009

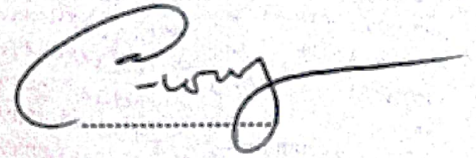
2. Ketua Jurusan Kehutanan


Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.
NIP 197310121999032001

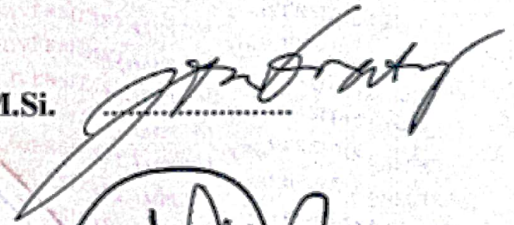
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

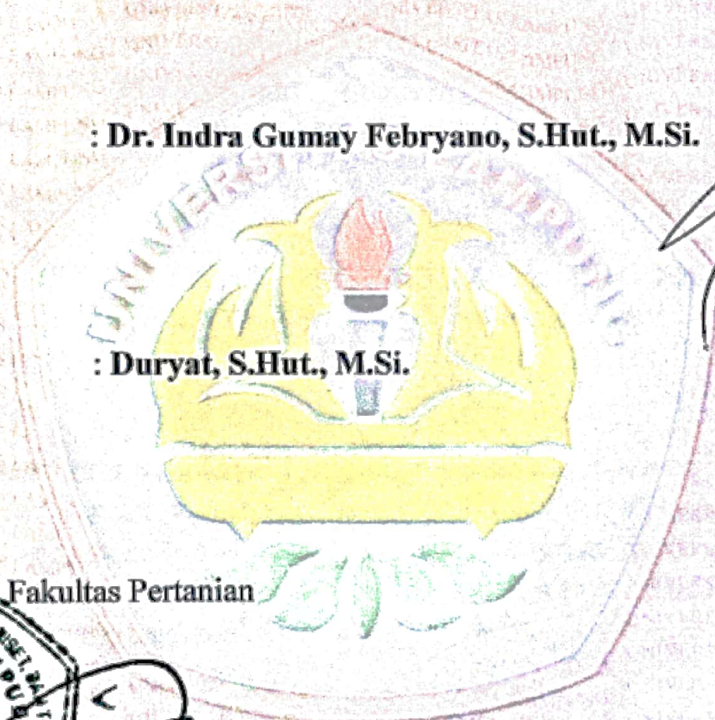
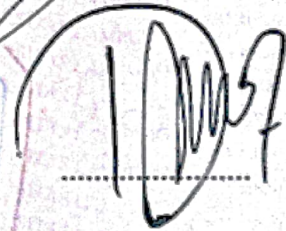
Ketua Komisi : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Anggota : Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.



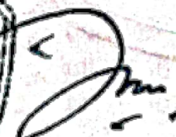
Anggota : Duryat, S.Hut., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 13 Mei 2024

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tanagn dibawah ini:

Nama : Bryan Wahyu Permana
NPM : 2054151008

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

“PERBANDINGAN SIFAT FISIK, MEKANIK, DAN BIOENERGI PELET TOREFAKSI DARI KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN SEKAM PADI (*Oryza sativa L.*)”

Adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan norma dan etika akademik yang berlaku saat ini. Kemudian, saya juga tidak keberatan apabila sebagian dari skripsi ini digunakan oleh dosen dan/atau program studi untuk kepentingan publikasi. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Juni 2024

Yang menyatakan



Bryan Wahyu Permana
NPM 2054151008

RIWAYAT HIDUP



Bryan Wahyu Permana (penulis) yang biasa disapa Bryan, dilahirkan di Lempuyang Bandar, 14 Mei 2002. Penulis sebagai anak ke dua dari dua bersaudara yang merupakan anak pasangan dari Ayah Suprih Lumadi dan Ibu Suci Purwanti. Penulis menempuh pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di Xaverius Terbanggi Besar tahun 2007-2008, Sekolah Dasar (SD) di SD Xaverius Terbanggi Besar tahun 2008-2014, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Xaverius Terbanggi Besar tahun 2014-2017, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Terbanggi Besar tahun 2017-2020. Tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Masuk Melalui Jalur Mandiri Wilayah Barat (SMMPTN Barat).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi di dalam kampus maupun di luar kampus. Penulis mengikuti organisasi internal dalam kampus yaitu Himpunan Mahasiswa Kehutanan (Himasyulva) sebagai Ketua Bidang Penelitian dan Pengembangan Organisasi selama satu periode (tahun 2023) dan penulis juga aktif di organisasi eksternal kampus yaitu Sylva Indonesia (SI) sebagai staff Pengkaderan Penguatan Organisasi (PPO) tahun 2022-2024.

Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti penulis yaitu kegiatan kuliah kerja nyata (KKN) di Desa Kanyangan, Kecamatan Kota Agung Barat, Kabupaten Tanggamus selama 40 hari. Penulis juga mengikuti kegiatan praktik umum (PU) di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM) yaitu di KHDTK Wanagama, Gunung Kidul, Yogyakarta dan KHDTK Getas, Blora, Jawa Tengah pada bulan Agustus 2023 selama 20 hari. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen mata kuliah Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Konservasi Tanah Air (PDAS

& KTA) semester Ganjil (2022); Pemetaan dan Geomatika Dasar Kehutanan semester Genap (2023); Biologi (2023); Struktur dan Sifat-sifat Kayu semester Genap (2024); dan Penginderaan Jauh semester Genap (2024). Penulis menghasilkan karya ilmiah yang dipresentasikan di Seminar Internasional Bilgi Seli Kongreleri di Turki dengan judul “Comparison of Moisture Content and Discoloration of Torrefied Pellets from Rubber Wood (*Hevea brasiliensis*) and Rice Husk (*Oryza sativa*)”.

Dalam Nama Tuhan Yesus Kristus
Kupersembahkan karya tulis ini untuk orang tuaku tersayang
Bapak Suprih Lumadi & Ibu Suci Purwanti

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Perbandingan Sifat Fisik, Mekanik, dan Bioenergi Pelet Torefaksi Dari Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) dan Sekam Padi (*Oryza sativa* L.)” dapat diselesaikan dengan baik sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan, petunjuk, serta dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan rasa hormat dan terimakasih 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. Hj. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama serta dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku penguji pertama pada ujian skripsi. Terima kasih atas masukan dan saran-saran pada seluruh rangkaian proses sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Duryat, S.Hut., M.Si. selaku dosen penguji kedua pada ujian skripsi. Terima kasih atas masukan dan saran-saran pada seluruh rangkaian proses sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Segenap dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan wawasan dan ilmu

pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan dan Staff administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

8. Bapakku tersayang Suprih Lumadi yang telah memberikan dukungan, doa, nasihat, kasih sayang tak terhingga, serta tanggung jawab sebagai seorang bapak yang tulus kepada penulis. Terimakasih atas perjuangan serta pengorbanan yang memotivasi penulis hingga dapat bertahan sampai saat ini. Terimakasih atas segala bentuk yang telah diberikan dan ayah akan selalu menjadi cinta pertama penulis.
9. Ibuku Suci Purwanti, terimakasih telah mendidik, sabar, memberikan doa, nasihat, kasih sayang, serta dukungan dalam setiap keputusan penulis. Terimakasih telah menjadi contoh seseorang yang kuat berjuang melawan banyak penyakit dan tantangan sehingga penulis terus terdorong untuk berjuang dan kuat dalam melewati banyaknya hambatan dan juga dapat menyelesaikan skripsi dengan maksimal.
10. Kakak Penulis Daniel Cientifica yang telah memberikan motivasi, semangat, dukungan, serta bantuan material maupun non-material selama perkuliahan ini.
11. Teman seperbimbingan (Wahyu, Ratu, Amel, Cikal, Hafiz) yang sudah berjuang bersama dalam proses skripsi.
12. Teman-teman, sahabat, dan kerabat yang telah banyak memberikan semangat serta dukungan penulis dalam akademik maupun non-akademik.
13. Keluarga besar angkatan 2020 (BEAVERS) dan keluarga besar Himasyilva Universitas Lampung yang telah kebersamai serta membantu dalam perkuliahan.
14. Serta seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis yang telah banyak membantu penulis selama melakukan perkuliahan dan proses skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, tetapi penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi pembaca.

Bandar Lampung, 10 Juni 2024

Bryan Wahyu Permana

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Kerangka Pemikiran.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia	6
2.2. Biomassa	7
2.3. Sekam Padi.....	9
2.4. Kayu Karet	11
2.5. Pelet Biomassa	13
2.6. Karakteristik Pelet.....	15
2.6.1. Kuat Tekan	15
2.6.2. Proksimat	15
2.6.3. Nilai Kalor.....	18
2.7. Torefaksi	19
2.8. Parameter Ukuran dan Ketahanan Pelet	20
III. METODOLOGI	23
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	23
3.2. Alat dan Bahan.....	23
3.3. Bahan dan Langkah Kerja.....	23
3.4. Pengujian Sifat Fisis	24

3.4.1. Perubahan Warna	24
3.4.2. Kerapatan	25
3.4.3. Uji Ketahanan Air	26
3.5. Pengujian Sifat Mekanis	26
3.6. Uji Penyerapan Kelembaban.....	27
3.7. Pengujian Proksimat	27
3.8. Pengujian Nilai Kalor	29
3.9. Hasil Produk Padat.....	29
3.10. Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	30
3.11. Analisis Data	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Perubahan Warna	31
4.2. Kerapatan	36
4.3. Daya Tahan Air.....	38
4.4. Kuat Tekan.....	40
4.5. Penyerapan Kelembaban.....	41
4.6. Proksimat	42
4.7. Nilai Kalor	48
4.8. Hasil Produk Padat.....	49
4.9. Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	50
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1. Kesimpulan	53
5.2. Saran	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Standar mutu pelet biomassa.....	22
Tabel 2. Klasifikasi perubahan warna.....	25
Tabel 3. Efek perlakuan torefaksi terhadap perubahan warna.....	35
Tabel 4. Perbandingan kerapatan pelet sebelum dan sesudah torefaksi.....	36
Tabel 5. Analisis proksimat sebelum dan sesudah torefaksi.....	43
Tabel 6. Analisis EY sesudah perlakuan torefaksi.....	49
Tabel 7. Hasil analisis FTIR pelet sekam padi dan kayu karet.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran.....	5
2. Sekam padi.....	9
3. Kayu karet.....	11
4. Proses peletisasi menggunakan mesin pelet (<i>pelletizer</i>).....	13
5. Pelet torefaksi.....	19
6. Proses torefaksi dengan oven.....	24
7. Perbandingan perubahan warna pelet sebelum dan sesudah torefaksi....	31
8. Perbandingan perubahan warna pelet torefaksi dalam sRGB.....	32
9. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan L^*	33
10. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan a^*	34
11. Perbandingan efek torefaksi terhadap perubahan b^*	35
12. Perbandingan kerapatan pelet sekam padi dan kayu karet.....	37
13. Pengaruh perlakuan torefaksi terhadap ketahanan air pada pelet.....	39
14. Efek torefaksi terhadap kuat tekan pada pelet.....	40
15. Kemampuan pelet dalam menyerap kelembaban.....	41
16. Efek torefaksi terhadap kadar air.....	43
17. Efek torefaksi terhadap zat menguap.....	45
18. Efek torefaksi terhadap kadar abu.....	46
19. Efek torefaksi terhadap karbon terikat.....	47

20. Efek torefaksi terhadap nilai kalor	48
21. Analisis FTIR pada pelet sebelum dan sesudah torefaksi	51

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Konsumsi energi fosil yang tinggi memicu kenaikan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dari hasil pembakaran tersebut (Tsandra *et al.*, 2023). Para ahli berpendapat, dengan pola konsumsi seperti sekarang diperkirakan energi fosil akan segera habis (Parinduri dan Parinduri, 2020). Jika laju penggunaan energi saat ini tidak dilanjutkan, Indonesia bisa saja mengalami kekurangan energi pada tahun 2046 mendatang (Romadhon dan Subekti, 2023). Biomassa saat ini digunakan secara luas sebagai pakan ternak, bahan baku pengomposan, dan sumber bioenergi dimana sekam dibakar secara langsung, tetapi tidak efisien, sehingga diperlukan pemanfaatan limbah biomassa yang lebih baik (Hamidah dan Rahmayanti, 2017). Bahan bakar organik, yang dibuat oleh tumbuh-tumbuhan melalui proses fotosintesis (dengan bantuan energi matahari), dikenal sebagai biomassa (Maulani *et al.*, 2024; Ridhuan *et al.*, 2019).

Potensi biomassa di Indonesia yang digunakan sebagai sumber energi jumlahnya sangat melimpah mencapai 146,71 juta ton per tahun (Naviza *et al.*, 2024; Parinduri dan Parinduri, 2020). Menurut Utomo dan Yunita (2014), hampir seluruh sekam padi yang diproduksi di negara-negara *Association of Southeast Asia Nations* (ASEAN) merupakan limbah dan belum dimanfaatkan secara maksimal. Di Indonesia sendiri pada tahun 2006 hingga 2008 produksi padi mencapai 57,29 juta ton, dengan jumlah sekam sekitar 280 g per kg padi (Maulana, 2016). Hasil dari limbah sekam padi sebanyak 50 ton sekam padi dengan rata-rata produksi 350 ton padi dalam satu kali produksi (Asfar *et al.*, 2021). Limbah sekam padi biasanya digunakan sebagai penambah unsur hara,

pakan ternak, dan bahan alternatif. Selain limbah sekam padi, di Indonesia sendiri memiliki permasalahan lain yaitu hasil pemanenan kayu karet, dimana hasil pemanenan pohon karet yang tidak lagi efektif menghasilkan getah akan ditebang dan bagian batang, cabang, atau ranting dari kayu karet akan menumpuk sehingga tidak termanfaatkan secara maksimal (Ridjayanti *et al.*, 2023; Riyadi *et al.*, 2019).

Inovasi yang dapat memanfaatkan limbah ini sangat dibutuhkan untuk menjadi solusi dari permasalahan yang sedang dihadapi saat ini, seperti pelet biomassa (Iryani *et al.*, 2023; Rani *et al.*, 2023). Padatan berukuran kecil dari proses densifikasi disebut pelet (Soolany, 2020). Proses densifikasi biomassa (peletisasi dan briketisasi) biasanya dilakukan melalui proses pengeringan, pencacahan, penggilingan, dan pemadatan, yang dapat mengatasi kelemahan-kelemahan tersebut (Nabila *et al.*, 2023). Produk biomassa yang dikenal sebagai pelet biomassa pada dasarnya diperkecil ukurannya dan dipadatkan menjadi bentuk silinder, sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar yang berasal dari biomassa (Firdhaus *et al.*, 2023). Berdasarkan SNI 8675, pelet harus memiliki minimal panjang 30 mm dan minimal diameter 5 mm. Pelet memiliki bentuk fisik yang seragam dan lebih baik dalam penanganan, penyimpanan dan transportasi (Lamers *et al.*, 2015). Meskipun serbuk gergaji dan serpihan kayu lebih disukai dalam industri skala kecil, pelet kayu lebih mudah digunakan dalam industri skala besar dalam hal perdagangan dan transportasi jarak jauh (Sultana dan Kumar, 2012). Konversi biomassa menjadi pelet memiliki beberapa keuntungan, seperti meningkatkan nilai kalor per satuan volume, memudahkan dalam penyimpanan dan pengangkutan, serta membuat ukuran dan kualitasnya seragam (Rubiyanti *et al.*, 2019). Konversi biomassa tanaman menjadi pelet juga akan menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan baku aslinya (Jianfeng *et al.*, 2010).

Proses yang diperlukan untuk membuat pelet yaitu densifikasi yang artinya konversi energi biomassa menjadi padatan berbentuk pelet yang tujuannya untuk memudahkan penyimpanan dan juga pengangkutan serta meningkatkan nilai kalori per unit volume (Nasution *et al.*, 2022). Peletisasi biomassa dapat membantu mewujudkan pengelolaan sumber daya hutan yang berkelanjutan (Candan *et al.*, 2013). Proses peletisasi biomassa melibatkan pemadatan biomassa

dengan atau tanpa bahan pengikat pada suhu dan tekanan yang relatif tinggi untuk mencapai energi per volume material yang lebih tinggi (Gilvari *et al.*, 2019). Peletisasi adalah proses ekstrusi, menghasilkan panas dan tekanan pada cetakan saat material didorong masuk, hal ini melunakkan lignin, mengikat partikel menjadi satu (Bulter *et al.*, 2023).

Peningkatan kualitas pelet biomassa dapat dilakukan melalui proses torefaksi (Rubiyanti *et al.*, 2019). Torefaksi adalah proses termal dalam keadaan oksigen terbatas (*inert*) pada kisaran suhu sekitar 200°C-300°C (Haryanto *et al.*, 2021; Maryenti *et al.* 2017). Sebutan lain untuk torefaksi yaitu seperti pemanggangan, pirolisis rendah, mengoven kayu, dan pengeringan dengan suhu tinggi (Hidayat *et al.*, 2021). Torefaksi dapat mempengaruhi sifat fisik, kimia, mekanik, dan bioenergi biomassa, sehingga meningkatkannya meningkatkan nilai efisiensi dari pelet tersebut (Chen *et al.*, 2015; Hidayat *et al.*, 2022). Torefaksi adalah proses perlakuan termokimia biomassa pada kisaran suhu 200-300°C pada kondisi anaerobik dengan laju pemanasan yang rendah dan waktu pemanggangan yang lama, sekitar 30 menit hingga 2 jam (Tumuluru *et al.*, 2011). Selain meningkatkan nilai kalor, torefaksi juga meningkatkan hidrofobisitas bahan bakar, mengurangi konsumsi energi penggilingan, dan dapat mencegah degradasi oleh jamur dan mikroba selama penyimpanan dan pengangkutan (Alamsyah *et al.*, 2017; Tumuluru *et al.*, 2011).

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan penggunaan berbagai jenis biomassa dan mengevaluasi beberapa karakteristik pelet hasil torefaksi. Hidayat *et al.* (2024), melaporkan hasil pelet yang ditorefaksi dengan *Fixed Counter-Flow Multi-Baffle (Fixed COMB)* diperoleh nilai proksimat meliputi zat terbang (*volatile matter*) sebesar 92,40%, kadar abu (*ash content*) 1,33%, dan karbon terikat (*fixed carbon*) 6,27%. Penelitian lain terkait proses torefaksi juga dilakukan oleh Abdulyekeen *et al.* (2021), didapatkan hasil proksimat dari sisa pelet kayu dengan proses torefaksi yaitu zat menguap sebesar 73,54%, kadar abu 5,29%. Simonic *et al.* (2020), melaporkan hasil produk dari pelet kayu oak yang ditorefaksi pada suhu 280°C menghasilkan kadar air 10,45%, zat menguap 79,12%, kadar abu 3,24%, karbon terikat 48,53%, dan nilai kalor 19,07 MJ/kg. Soponpongpiat *et al.* (2015), melaporkan hasil pelet jerami padi yang ditorefaksi

pada suhu 280°C dengan waktu 60 menit menghasilkan kadar abu 24,05%, zat mudah menguap 46,00%, karbon terikat 30,09%, dan nilai kalor 20,73 MJ/kg.

Sebagaimana penjelasan tersebut, telah banyak dilakukan penelitian pembuatan pelet biomassa. Namun, belum ada yang membandingkan karakteristik pelet biomassa dari sekam padi dan kayu karet. Oleh karena itu penelitian mengenai perbandingan karakteristik pelet dari sekam padi dan kayu karet dirasa perlu untuk dilakukan, dengan tujuan untuk mengetahui mana pelet yang lebih baik dalam penggunaannya sebagai bahan bakar berbasis biomassa.

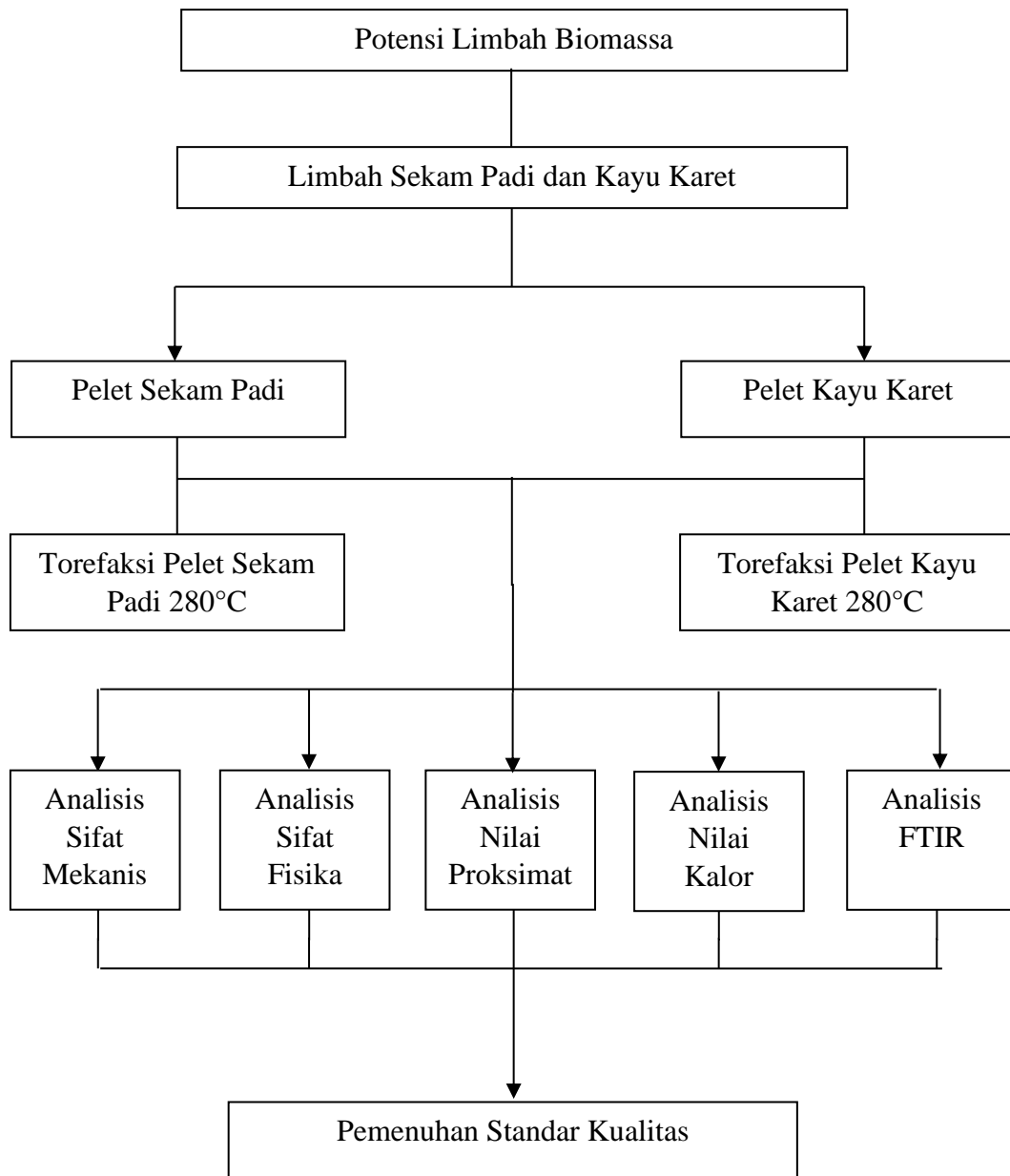
1.2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, penelitian ini bertujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis sifat fisik, mekanik, dan bioenergi yang terdapat pada pelet sekam padi dan pelet kayu karet sebelum dan sesudah torefaksi.
2. Menganalisis perbandingan hasil analisis sifat fisik, mekanik, dan bioenergi pelet sekam padi dengan pelet kayu karet sebelum dan sesudah torefaksi.
3. Menentukan terpenuhi atau tidaknya standarisasi pelet sekam padi dan palet kayu karet sebelum dan sesudah torefaksi sebagai bahan bakar biomassa.

1.3. Kerangka Pemikiran

Penggunaan bahan bakar alternatif terbarukan dibutuhkan teknologi secara berkelanjutan. Indonesia memiliki potensi alam yang melimpah yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bioenergi. Sekam padi dan kayu karet merupakan limbah organik yang dapat dikonversi menjadi biopelet. Namun perbandingan karakteristik pelet sekam padi dengan pelet kayu karet belum pernah dilakukan penelitian untuk menentukan mana yang lebih baik sehingga hal inilah yang mendasari penelitian ini. Berdasarkan uraian sebelumnya maka dilakukan penelitian dengan kerangka yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia

Saat ini, terdapat konflik antara produksi dan permintaan energi berbahan bakar batubara di Indonesia. Kebutuhan energi dan permintaan energi selalu meningkat guna mendukung pertumbuhan dan pembangunan ekonomi. Sebaliknya, kapasitas produksi minyak bumi Indonesia meningkat dalam kurun waktu yang sama. Thacker (2014) berhipotesis bahwa Indonesia mungkin perlu memenuhi lebih dari 70% permintaan domestiknya untuk bioenergi pada tahun 2025 karena meningkatnya permintaan energi dan meningkatnya produksi bioenergi dalam negeri. Oleh karena itu, perlu adanya upaya yang serius untuk mencari sumber energi alternatif untuk bahan bangunan berbahan bakar fosil serta melakukan upaya peningkatan efisiensi penggunaan energi. Bioenergi, sering dikenal sebagai energi biomassa, adalah salah satu jenis energi yang tersedia saat ini yang dapat mendukung pertumbuhan ekonomi sejalan dengan tujuan konstruksi jangka panjang.

Perkebunan dan pertanian merupakan sektor bisnis yang sangat berkembang di Indonesia, hal tersebut menunjukkan potensi yang cukup tinggi untuk memenuhi sumber bahan baku pembuat biomassa. Menurut Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (DITJEN EBTKE), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KEMEN ESDM) (2013), telah memetakan potensi penghasil biomassa dari berbagai sektor yang ada di Indonesia, dari peta tersebut dapat dilihat daerah mana saja yang memiliki potensi paling tinggi, sehingga dapat dijadikan lokasi produksi energi biomassa yang lebih efisien. Menurut Kasmainer *et al.* (2022), energi yang dapat diperoleh dari biomassa di Indonesia sangat besar yaitu 49.810 MW atau 49,81 GW, namun dari sangat

besarnya daya yang dihasilkan tersebut masih sangat sedikit energi yang termanfaatkan.

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) (2020), bioenergi dapat berasal dari biomassa cair, gas, atau padat yang dapat bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Produk bioenergi terus dikembangkan mulai dari *wood chips*, *wood pellet*, *wood charcoal*, *dimethyl ether (DME)*, *biomethanol*, biodiesel, *biobutanol*, dan lainnya. Tujuan pengembangan bioenergi antara lain untuk mengurangi emisi GRK dan meningkatkan kualitas lingkungan. Potensi bioenergi untuk energi listrik bisa didapatkan dari Hutan Tanaman Industri, dimana berbagai sumber daya seperti kayu, sekam padi, sisa biomassa, dan lainnya dapat dibuat menjadi pelet atau bahan bakar biomassa untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga biomassa atau menggantikan sebagian bahan bakar fosil atau solar dengan biomassa yang akan mengurangi emisi dan impor bahan bakar (Mauritio *et al.*, 2022). Bioenergi memiliki nilai dan potensi strategis bagi Indonesia. Negara Indonesia mempunyai wilayah yang sangat luas yang terbagi antara beberapa pulau besar dan kecil. Kondisi ini berdampak pada transmisi dan distribusi listrik serta bahan bakar minyak (BBM).

Menurut Kong (2010), terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan sebagai bahan pertimbangan dalam penggunaan biomassa, yakni selain aspek ketersediaan biomassa yang telah dibahas sebelumnya ialah aspek nilai kalori dan kandungan dari biomassa tersebut (*moisture content*, *ash content*, *volatile matter*, unsur klorin, dan sebagainya). Dengan mengetahui kandungan yang dimiliki oleh suatu biomassa tertentu, maka dapat ditentukan jalur konversi termal (pembakaran langsung, pirolisis, gasifikasi atau fermentasi) yang paling cocok untuk jenis biomassa tersebut.

2.2. Biomassa

Baik sebagai produk maupun organik lainnya, biomassa merupakan bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis (Suganal dan Hudaya, 2019). Biomassa mempunyai landasan yang dapat dibangun, menjadikannya satu-satunya sumber energi bersih alternatif yang dapat memasok energi dengan cara yang terdiversifikasi. Salah satu jenis biomassa dari sektor kehutanan yang mempunyai

banyak potensi adalah biomassa limbah kayu, seperti limbah penebangan dan limbah penggergajian kayu, yang harus dimanfaatkan seefektif mungkin agar jumlah bahan bakar yang dihasilkan semakin banyak (Adrian *et al.*, 2015).

Biomassa dapat didefinisikan sebagai semua bahan organik yang dapat terbiodegradasi yang berasal dari hewan, tumbuhan, atau mikroorganisme. Sumber daya biomassa meliputi bahan alam dan turunannya. Biomassa mencakup bahan mentah pertanian dan residunya (misalnya jerami, biji-bijian sereal, cangkang biji, dan lainnya), kayu dan residunya, residu hutan dan pabrik, limbah industri dan limbah kota, serta kotoran dan residu hewan (Uddin *et al.*, 2018).

Sebagai sumber energi terbarukan, biomassa memiliki beberapa keunggulan, antara lain kompatibilitas dengan infrastruktur yang ada dan pengiriman yang cepat. Selain itu, penggunaan bioenergi dibandingkan bahan bakar fosil tradisional berpotensi mengurangi emisi GRK dan konsumsi sumber daya tak terbarukan (McKechnie *et al.*, 2016). Biomassa dapat digunakan untuk produksi energi yang mencakup berbagai macam bahan, dan dianggap sebagai sumber daya energi yang penting di seluruh dunia (Qi *et al.*, 2016).

Dimungkinkan untuk mengolahnya menjadi biogas, biofuel, dan bahan bakar padat, sehingga dapat diubah dengan berbagai cara, seperti gasifikasi, pirolisis, atau pembakaran (Uddin, 2018). Selain itu, biomassa merupakan pembawa energi rendah emisi dalam hal karbon dioksida (CO₂). Oleh karena itu, keseimbangan CO₂ biomassa di atmosfer berada pada angka nol, sesuai dengan asumsi Perjanjian Paris tentang perencanaan pengurangan emisi CO₂ melalui peningkatan penggunaan biomassa untuk energi (Niedzółka *et al.*, 2014)

Biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar cadangan atau pengganti solar di wilayah utara karena potensi pengurangan karbon (Asmara *et al.*, 2023). Mirip dengan solar, bahan bakar ini dapat diangkut ke tujuan-tujuan terpencil melalui rute logistik yang ada dan pengaturan penggunaan solar (Mafakheri *et al.*, 2020). Semakin banyak pengakuan bahwa biomassa kayu dapat berfungsi sebagai bahan baku energi terbarukan. Selain menggantikan bahan bakar fosil yang tidak terbarukan, hal ini juga mengurangi emisi GRK, meningkatkan ketahanan energi lokal dan regional, dan dapat menciptakan peluang ekonomi baru di seluruh rantai pasokannya (Dias *et al.*, 2017). Berkat proses alami fotosintesis, hutan menyerap

CO₂ di atmosfer. Ketika pohon ditebang, sebagian CO₂ dilepaskan kembali ke atmosfer, sedangkan sisanya terakumulasi dalam produk berbahan dasar kayu (Leskinien *et al.*, 2018). Biofuel serat kayu terkompresi, yang dikenal sebagai pelet kayu, telah menjadi populer untuk pemanas rumah tangga (Laschi *et al.*, 2016). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah pertanian cukup bernilai (Patabang, 2012; Santo *et al.*, 2010). Memanfaatkan teknologi beretika yang sesuai untuk negara berkembang dan mempunyai kemampuan jangka panjang (Apriani, 2015). Energi dari pemanfaatan limbah padi, seperti halnya sekam, dapat digunakan sebagai alternatif pengganti bakar yang bermanfaat bagi kebutuhan manusia (Santo *et al.*, 2010).

2.3. Sekam Padi

Tanaman padi dalam sistematika tumbuhan (taksonomi) diklasifikasikan sebagai berikut:

Divisi : *Spermatophyta*
Sub divisi : *Angiospermae*
Kelas : *Monocotyledoneae*
Ordo : *Poales*
Famili : *Graminae*
Genus : *Oryza* Linn
Spesies : *Oryza sativa* L



(Sumber: images.app.goo.gl/PYLkqGiw49dXWnM4A)

Gambar 2. Sekam padi

Sekam padi merupakan salah satu limbah yang paling banyak manfaatnya. Sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, abu gosok, bahan pembakar bata merah, campuran pembuatan batu bata, dan pupuk (Utomo dan Yunita, 2014). Akan tetapi sebenarnya, pemanfaatan sekam tidak sebatas itu saja. Dengan menggunakan teknologi yang tepat, sekam memiliki manfaat lain seperti sebagai bahan alternatif pengganti bahan bakar dan dengan pengolahan yang benar, limbah sekam dapat dimanfaatkan untuk dijadikan peluang bisnis dan sebagai sumber energi biomassa.

Sekam padi merupakan lapisan keras yang meliputi kariopsis yang terdiri dari dua belahan yang disebut lemma dan palea yang saling bertautan. Pada proses penggilingan beras sekam akan terpisah dari butir beras dan menjadi bahan sisa atau limbah penggilingan. Sekam dikategorikan sebagai biomassa yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti bahan baku industri, pakan ternak dan energi atau bahan bakar. Dari proses penggilingan padi biasanya diperoleh sekam sekitar 20-30%, dedak antara 8-12% dan beras giling antara 50-63,5% data bobot awal gabah. Sekam padi adalah lapisan keras yang terdiri dari kariopsis yang terdiri dari dua jenis daun sekam mahkota dan sekam kelopak. Sekam diekstraksi dari jaringan serat-serat selulosa, yang terutama mengandung serabut-serabut keras yang banyak mengandung silika. Dalam keadaan normal, sekam memainkan peran penting dalam melindungi biji dari kerusakan yang disebabkan oleh jamur. Sekam juga dapat berfungsi sebagai penghalang dan melindungi biji dari jamur susupan (Haryadi, 2006).

Proses penggilingan padi menghasilkan sekitar 25% dari produksi padi, yang seringkali hanya diproduksi di sekitar pabrik sebagai limbah dan kadang-kadang hanya dipanggang. Hasil dari proses ini adalah sekitar 25% sekam, 8% dedak, 2% bekatul, dan 65% beras. Sekam padi memiliki beberapa kandungan kimia penting. Ini termasuk kadar air (32,40% - 41,35%), serat (31,37% - 49,92%), abu (13,16% - 29,04%), pentosa (16,94% - 21,95%), selulosa (34,34% - 43,80%), dan lignin (21,40% - 46,97%) (Nurhilal, 2017). Karena banyak sekam padi limbah yang tidak digunakan, kita harus meningkatkannya.

2.4. Kayu Karet

Klasifikasi tanaman karet sebagai berikut:

- Divisi : *Spermatophyta*
Subdivisi : *Angiospermae*
Kelas : *Dicotyledonae*
Ordo : *Euphorbiales*
Family : *Euphorbiaceae*
Genus : *Hevea*
Spesies : *Hevea brasiliensis* Muell Arg.



(Sumber: images.app.goo.gl/e6TYfaFxtVU64mW58)

Gambar 3. Kayu karet

Pada tahun 2017, luas keseluruhan perkebunan karet di Indonesia adalah 3.672.123 ha yang terbagi dalam beberapa jenis perkebunan rakyat, nasional, dan swasta (Direktorat Jendral Perkebunan, 2017). Karet merupakan tanaman yang mudah digunakan dan dapat tumbuh dengan aman di lingkungan tropis. Tanaman karet merupakan tanaman tradisional dan dapat diproduksi hingga umur 25 hingga 30 tahun. Kapasitas tumbuhan karet maksimum yang dapat dicapai sekitar 476 batang per ha. Namun, tidak semua yang dicapai akan mampu hidup pada 450 batang atau lebih. Meski banyak petani yang tidak menyadari atau hanya sedikit menyadari manfaat utama perawatan tanaman, seperti pemberantasan hama atau pemupukan (Iskandar, 2018). Dinas Perkebunan Provinsi Lampung (2013), luas areal tanaman karet seluas 133.168 ha dikelola oleh perkebunan negara, perkebunan swasta, dan perkebunan rakyat. Rata-rata produksi, luas areal perkebunan dan produktivitas karet Provinsi Lampung selama kurun waktu 2005-

2015 sebesar 43,99 ton/ha. Luas areal perkebunan karet Provinsi Lampung cenderung mengalami peningkatan, diiringi dengan adanya peningkatan produksi dan produktivitas karet (Dinas Perkebunan Provinsi Lampung, 2015).

Batas umur produktif tanaman karet relatif pendek, yaitu sekitar 25 tahun. Jika pohon sudah tua di atas usia ini, produksi lateks akan menurun dan batang akan mengeras. Pohon karet yang masih produktif umumnya hanya sebatas pengambilan lateksnya setelahnya jarang dimanfaatkan, sedangkan pohon karet yang tidak produktif hanya dimanfaatkan sebagai kayu bakar atau arang. Pemanfaatan batang karet untuk bagian kayunya belum banyak berkembang, sementara keterbatasan bahan baku kayu untuk konstruksi dan non-konstruksi, terutama yang berasal dari hutan tropis, harus diatasi dengan melakukan pemanfaatan kayu yang belum banyak dikenal tetapi memiliki potensi yang besar dan memiliki sifat kayu yang unggul (Kusumawardi *et al.*, 2018). Menurut Djaenuddin *et al.* (2000), kayu karet optimum tumbuh di daerah dengan temperatur 26°C - 30°C, curah hujan 2.500 – 3.000 mm per tahun. Karet tumbuh pada berbagai tipe tanah dengan kedalaman tanah >100 cm, bertekstur liat sampai lempung berliat, memiliki drainase baik, pH tanah berkisar antara 5 - 6, pada lahan yang mempunyai kecuraman lereng < 8%.

Ciri fisik kayu karet berkisar pada batang bagian pangkal, tengah, dan ujung batang. Kadar lignin rendah (20,68%) dan kadar selulosa tinggi (67,38%), bagian tengah (59,37%), dan ujung (45,73%) di batang karet bagian pangkal. Karena bagian pangkal sudah tertekuk oleh embun, maka struktur batang karet bagian pangkal lebih rapi dibandingkan dengan bagian tengah dan ujung batang. Dilihat dari struktur dan sifat kayunya, sel merupakan komponen terkecil pada tanaman. Satu unit sel terdiri dari rongga dan dinding sel, dan setiap jenis pohon mempunyai dimensi rongga dan dinding sel yang berbeda-beda (Boerhendhy *et al.*, 2001). Hemiselulosa adalah polimer dari monosakarida seperti glukosa, manosa, galaktosa, xilosa, arabinosa, asam 4-O-metilglukuronat, dan asam galakturonat. Selulosa adalah homopolisakarida linier dengan unit dasar bernama selobiosa (dua glukosa anhidrida) (Sukiran *et al.*, 2017). Lignin adalah polimer kompleks yang terdiri dari unit propilbenzena yang berbeda yang dihubungkan oleh berbagai eter dan ikatan C-C (Liew *et al.*, 2017). Umumnya, selulosa dan

hemiselulosa terikat kuat pada lignin, di mana hemiselulosa bertindak sebagai agen penghubung (Lee *et al.*, 2017).

2.5. Pelet Biomassa

Salah satu sumber energi terbarukan utama adalah biomassa bentuk padat, terdiri dari bahan baku organik non-fosil yang asalnya dari sumber biologis dan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan panas atau tenaga serta dapat diperbaharui kembali. Biomassa padat seperti batang pohon, serpih, briket, pelet, dan limbah kehutanan seperti cabang, semak, perdu, kayu dari penjarangan, tunggul, dan sisa dari industri selulosa dan serbuk gergaji adalah contoh kayu bakar (Klepacka dan Florkowski, 2019).



(Sumber: images.app.goo.gl/PhjHBQoq7w6Te7Sx8)

Gambar 4. Proses peletisasi menggunakan mesin pelet (*pelletizer*)

Pelet biomassa adalah jenis bahan bakar padat yang diproduksi untuk keperluan yang berhubungan dengan energi. Biofuel padat yang seragam dan mudah digunakan ini diperoleh melalui proses pemadatan yang dikenal sebagai peletisasi (Civitarese *et al.*, 2019), yang melibatkan pengepresan kayu giling. Peletisasi adalah proses ekstrusi di mana biomassa kering yang dimurnikan diberi tekanan dan suhu tinggi, dan ditekan melalui lubang sepanjang beberapa meter, sehingga dihasilkan silinder-silinder kecil, ini akhirnya dipotong sesuai panjang

yang dibutuhkan dan didinginkan (Whittaker *et al.*, 2017) (Gambar 4). Peletisasi juga memungkinkan peningkatan konversi termokimia (Widjaya *et al.*, 2018), karena tingkat kelembaban yang konstan (Muth *et al.*, 2014). Pelet kayu diklasifikasikan sebagai biomassa dan mencakup kehutanan, pemrosesan kayu, dan kayu balsa yang dihasilkan kayu. Proses pemadatan digunakan agar pelet dapat meningkatkan kandungan kalori per volumenya sebagai persiapan menghadapi larangan pembuatan bakar bakar. Selain itu, kompor pelet biomassa berbeda dengan peralatan memasak berbahan bakar kayu, kompor pelet dapat dengan cepat menyelesaikan pembakaran tanpa asap (Pradnyaswari *et al.*, 2022).

Membandingkan pelet biomassa dengan bahan bakar berbahan dasar fosil, pelet biomassa merupakan bahan bakar yang kaya energi dengan daya tampung lingkungan yang lebih besar. Pada tahun 2008, Norwegia, Swiss, dan EU-27 secara keseluruhan menghasilkan 12,61 juta ton emisi CO₂. Dibandingkan dengan bahan turunan biomassa lainnya pelet biomassa memiliki nilai kalor yang tinggi (Proskurina, 2016). Serpihan kayu sering digunakan secara lokal dan pelet biomassa juga dapat digunakan di daerah perkotaan dan bangunan publik yang besar (Giacomo, 2009). Karena volumenya yang lebih rendah dan kepadatan energi volumetrik yang lebih tinggi, pelet lebih efektif untuk menyimpan, mentransfer, dan mengubah energi daripada kayu mentah (Uslu *et al.*, 2008). Langkah pertama dalam pembuatan pelet adalah menyimpan bahan baku, dan langkah selanjutnya adalah mengangkut bahan baku basah ke tempat pengering agar kadar airnya dapat dikurangi hingga 10%. Banyak faktor, seperti ukuran partikel bahan baku, kelembaban udara, suhu relatif, dan metode pengeringan, mempengaruhi energi yang dibutuhkan untuk pengeringan. Bahan biomassa dikeringkan sebelum dipotong atau ditumbuk menjadi ukuran partikel yang dibutuhkan untuk produksi pelet, selain serbuk gergaji. Setelah peletisasi, partikel dikirim ke fasilitas penyimpanan, *counter stream chiller*, dan pendingin lainnya (Trømborg *et al.*, 2013). Meskipun pelet biomassa merupakan alternatif yang sangat baik untuk bahan bakar fosil, beberapa hal dapat mengubah manfaat ekologisnya. Contohnya emisi metana, emisi dari perubahan penggunaan lahan yang berasal dari tanaman energi (ditanam di lahan non-marginal) (Röder, 2014).

Pelet biomassa merupakan salah satu produk yang dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif yang digunakan sebagai bahan bakar dan juga dapat diperbaharui. Pelet biomassa digunakan sebagai bahan bakar di Indonesia karena kandungan kalorinya yang tinggi dan dapat memitigasi penggunaan bahan bakar yang berbiaya tinggi dan bervolume tinggi (Suwadi dan Pebriana, 2018). Beberapa faktor penting, seperti kadar air, nilai kalor, kandungan halus, daya tahan mekanik, kepadatan partikel, kadar abu, dan titik leleh abu, mempengaruhi kualitas pelet biomassa. Standar EN 14961-1 (Eropa) dan PFI (Amerika Serikat) yang menentukan nilai parameter ini. Pemanfaatan berbagai bahan pengikat atau aditif selama pembuatan pelet kayu berdampak pada nilai parameter fisik dan termal tersebut. Jumlah maksimum aditif yang meningkatkan kualitas bahan bakar, mengurangi emisi, atau meningkatkan efisiensi pembakaran yang diizinkan oleh aturan Eropa adalah 2% dari total massa pelet kayu (European Pellet Council, 2011).

2.6. Karakteristik Pelet

2.6.1. Kuat Tekan

Analisis fisik pelet juga menentukan kualitasnya, salah satunya adalah kuat tekan yang diberikan pada permukaan pelet (Qistina *et al.*, 2016). Kuat tekan adalah sifat fisik briket yang terkait dengan kekuatan briket untuk menahan perubahan bentuk (Sinurat, 2011). Parameter kualitas fisik pelet dikenal sebagai kuat tekan. Nilai kuat tekan yang lebih tinggi menunjukkan daya tahan atau kekompakan pelet, sehingga pelet tidak mudah pecah (Aristiyanto dan Palupi, 2014).

2.6.2. Proksimat

Analisis proksimat menganalisis kimia bahan pakan berdasarkan komposisi kimia dan kegunaannya (Kurnijasanti, 2016). Analisis proksimat juga mencakup analisis kandungan makro zat dalam suatu biomassa, yang dapat dikatakan hanya berdasarkan perkiraan, tetapi sudah dapat menggambarkan komposisi biomassa (Ningsih dan Hermita, 2016). Menurut Hui (2006), analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui komponen utama suatu bahan makanan, yang utamanya terdiri dari kadar air, kadar abu, zat menguap, dan karbon terikat.

Pengujian proksimat ini dilakukan melalui pemanasan biomassa atau pembakaran (Elfiano *et al.*, 2016).

Kadar air atau *moisture content* (MC) adalah jumlah air dalam suatu benda, seperti tanah (juga disebut kelembaban tanah), bebatuan, bahan pertanian, dan sebagainya. Dalam bidang ilmiah dan teknik, kadar air biasanya ditunjukkan dalam rasio yang bermula dari nol (kering total) hingga nilai jenuh air di mana semua pori terisi air. Nilai dapat berupa basis basah atau kering, atau volumetrik atau gravimetrik (massa) (Kristina, 2018). Perhitungan kadar air diperlukan karena pelet biomassa memiliki sifat higroskopis yang tinggi, yang berarti bahwa mereka mudah menyerap air dari sekitarnya. Tujuan dari penghitungan kadar air adalah untuk mengetahui sifat higroskopis (Putri dan Andasuryani, 2017). Berat air di dalam bagian tumbuhan disebut kadar air, yang ditunjukkan dalam persen terhadap berat kering tanur (Manurung *et al.*, 2013). Kadar air sangat memengaruhi kualitas briket, semakin rendah kadar air briket, semakin tinggi nilai kalor dan daya pembakarannya. Kadar air yang tinggi akan mengurangi energi bahan bakar pada saat proses pembakaran, karena energi yang dihasilkan sebagian besar digunakan untuk proses pengeringan (Alwan *et al.*, 2020). Kadar air yang tinggi mengakibatkan biomassa menjadi sulit terbakar karena dibutuhkan sejumlah kalor laten untuk menguapkan air yang terkandung dalam biomassa tersebut dan kalor sensibel untuk menaikkan suhu. Menurut Febryanti dan Yulhendra (2019), kadar air sendiri terbagi menjadi dua yaitu kadar air bebas (*free moisture*) dan kandungan air bawaan (*inherent moisture*). Kadar air bebas adalah kandungan air pada permukaan dan retakan biomassa. Jumlah kadar air bebas dipengaruhi oleh kadar air biomassa, transportasi, penyimpanan, dan distribusi ukuran partikel. Karena sebagian besar kadar air ini berada di permukaan biomassa, maka semakin besar luas permukaan biomassa, semakin besar pula kandungan air bebasnya. Kandungan air bebas dapat dihilangkan dengan aerasi atau pemanasan hingga suhu maksimum 40°C. Kadar air inheren ada selama proses pembentukan biomassa. *Inherent moisture* adalah kandungan air yang terikat secara fisik di dalam biomassa, di dalam struktur pori-pori bagian dalam. *Inherent moisture* disebut juga dengan kadar air yang dianggap terdapat pada rongga-rongga kapiler dan pori-pori biomassa yang relatif kecil. Secara teori,

disebutkan bahwa *inherent moisture* terdapat pada kondisi dengan tingkat kelembaban 100% dan temperatur 30°C. Untuk menghilangkannya dengan cara dioven pada suhu 105°C -110°C.

Abu adalah sisa pembakaran bahan organik berupa zat organik yang komposisi dan kandungannya tergantung dari bahan dan cara pembakarannya (Hutomo *et al.*, 2015). Residu yang diperoleh merupakan total abu dari suatu sampel (Arziyah *et al.*, 2019). Pengukuran kadar abu merupakan salah satu parameter penting yang perlu dilakukan untuk mengevaluasi kandungan zat dan komposisi dalam suatu sampel (Liu, 2019). Kadar abu merupakan hasil yang tertinggal atau tersisa dari sampel bahan biomassa yang dibakar sempurna pada proses pengabuan. Kadar mineral atau abu dari suatu bahan biomassa bisa didapatkan dengan cara proses pengabuan untuk menghancurkan senyawa organik dan yang tertinggal serta menyisakan mineral saja (Smith *et al.*, 2023). Hal ini juga akan mengakibatkan timbulnya emisi partikulat yang tinggi dalam pembakaran sehingga perlu penanganan khusus untuk abu dan partikulat yang dihasilkan. Selain itu, abu bersifat *inert* sehingga mampu mengurangi efisiensi kalor yang dihasilkan dari bahan bakar (Fisafarani, 2010).

Zat menguap atau *volatile matter* (VM) adalah jumlah materi yang hilang ketika sampel biomassa dipanaskan pada suhu dan waktu yang telah ditentukan (setelah proses penghilangan uap air). Zat menguap terdiri dari gas yang mudah terbakar seperti hidrogen, CO dan CH₄ dan gas yang dapat dikondensasi seperti tar dengan sejumlah kecil gas yang tidak mudah terbakar seperti CO₂ dan air yang dihasilkan dari dehidrasi dan kalsinasi (Febryanti dan Yulhendra, 2019).

Kelembaban mempengaruhi hasil penentuan zat menguap sehingga sampel yang dikeringkan dengan oven memberikan hasil yang berbeda dengan sampel yang dikeringkan dengan udara. Faktor lain yang mempengaruhi penentuan zat menguap adalah suhu, waktu, distribusi partikel, dan ukuran partikel. Kandungan zat menguap ini dapat menguntungkan dalam hal penyalaan biomassa karena kandungan zat menguap (campuran dari uap dan gas yang keluar saat proses pirolisis dari biomassa) tersebut dapat melepaskan secara konveksi maupun radiasi, serta membentuk pori pada permukaan ketika zat menguap lepas dari permukaan biomassa. Zat menguap berkaitan erat dengan karbon terikat, semakin

tinggi kandungan zat menguap, semakin rendah nilainya. Ketika pembakaran biomassa dengan nilai zat menguap yang tinggi, maka akan mempercepat pembakaran karbon terikat. Zat menguap yang tinggi menunjukkan bahwa biomassa tersebut lebih mudah menyala dan lebih cepat terbakar (Fisafarani, 2010). Sebaliknya, zat menguap yang rendah akan mempersulit proses pembakaran.

Karbon terikat digunakan sebagai indeks hasil kokas biomassa ketika dikarbonisasi, atau sebagai ukuran bahan padat yang dapat dibakar dalam peralatan pembakaran biomassa setelah fraksi yang mudah menguap dihilangkan (Ruchjana *et al.*, 2019). Karbon terikat atau *fixed carbon* (FC) menggambarkan jumlah karbon yang terkandung dalam bahan residu setelah komponen yang mudah menguap dihilangkan. FC ini mewakili penguraian 146 konstituen organik biomassa dan senyawa nitrogen, sulfur, hidrogen, dan oksigen yang terlepas atau terikat secara kimiawi. Setelah dihitung untuk abu dan mineral, kandungan FC dapat digunakan sebagai indeks standar biomassa dan parameter untuk mengklasifikasikan biomassa (Febryanti dan Yulhendra, 2019). Karbon terikat yang tinggi menyebabkan semakin tinggi nilai kalori dari suatu biomassa karbon terikat bertindak sebagai pembangkit utama panas selama pembakaran.

2.6.3. Nilai Kalor

Nilai kalor adalah jumlah panas yang dihasilkan ketika sejumlah batu bara dibakar. Panas ini merupakan reaksi eksotermik yang melibatkan senyawa hidrokarbon dan oksigen. Nilai kalor ditentukan oleh kenaikan suhu selama pembakaran sejumlah biomassa. Nilai kalor didefinisikan sebagai jumlah energi panas maksimum yang dilepaskan atau ditimbulkan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna per satuan massa atau volume bahan bakar tersebut (Aljarwi *et al.*, 2020). Nilai kalor sangat penting untuk menentukan kualitas biobriket yang dibuat. Nilai kalor yang lebih tinggi sebanding dengan kualitas briket (Jannah *et al.*, 2022).

Nilai kalor dibagi menjadi dua diantaranya dikenal sebagai nilai kalor kotor (*gross calorific value*), adalah ukuran panas atau energi yang dihasilkan. Untuk menentukan kualitas pelet, nilai kalor kotor (*gross calorific value*) digunakan (Pahlevi *et al.*, 2019), dan nilai kalor bersih (*net calorific value*) adalah

nilai kalori bersih hasil pembakaran dimana kalori yang dihasilkan merupakan nilai kalor. Harga nilai kalori bersih ini dapat dicari setelah nilai kalori kotor diketahui.

2.7. Torefaksi

Torefaksi disebut dengan berbagai nama dalam literatur: pemanggangan (mirip dengan pemanggangan kopi), pirolisis lambat, pirolisis ringan, pemasakan kayu, atau pengeringan dengan suhu tinggi. Torefaksi biasanya merupakan tahap pertama yang diikuti oleh pirolisis dan terakhir gasifikasi selama perlakuan panas biomassa atau dekomposisi biomassa (Lange, 2007). Torefaksi adalah teknologi yang menjanjikan untuk meningkatkan biomassa untuk produksi bahan bakar padat. Di sepanjang permukaan biomassa, perpindahan panas dan massa berkaitan dengan pola arus berlawanan. Ketika biomassa diolah terlebih dahulu dalam suhu 200-300°C (Chen *et al.*, 2015; Nunes *et al.*, 2014; Bach *et al.*, 2016), panas yang ditransfer dari sekitarnya ke dalam biomassa menyebabkan pembebasan air dan zat menguap ke lingkungannya dan degradasi termal dari bahan yang diolah (Bates dan Ghoniem, 2012), terutama pada hemiselulosa (Chen dan Kuo, 2010) dan warnanya cenderung lebih gelap (Gambar 5). Hasilnya, biomassa hasil torefaksi memiliki rasio H/C dan O/C atomik yang lebih rendah dan dengan demikian memiliki nilai kalor yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan biomassa induknya. Keuntungan lain yang menyertai torefaksi termasuk peningkatan kemampuan menggiling dan meningkatkan homogenitas bahan lignoselulosa serta konversi biomassa higroskopis menjadi hidrofobik (Chen *et al.*, 2015; Bach *et al.*, 2016).



(Sumber: images.app.goo.gl/JxhGHTGGPGimBoEq9)

Gambar 5. Pelet torefaksi

Torefaksi adalah proses perlakuan termokimia terhadap biomassa pada kisaran suhu 200-300°C dalam kondisi anaerob dan laju pemanasan rendah atau waktu tinggal cukup lama, sekitar 30 menit hingga 2 jam (Tumuluru *et al.* 2011). Selain meningkatkan nilai kalori, torefaksi juga meningkatkan sifat hidrofobitas bahan bakar, mengurangi konsumsi energi penggilingan (*grindability*), dan dapat mencegah degradasi oleh jamur dan mikroba selama proses penyimpanan dan transportasi (Alamsyah *et al.* 2017; Tumuluru *et al.* 2011). Torefaksi merupakan proses termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada suhu 200–300 °C dalam kondisi sedikit atau tanpa oksigen (Mamvura dan Danha, 2020). Ketika dikombinasikan dengan peletisasi, torefaksi menghasilkan pelet dengan nilai kalor tinggi dan sifat-sifat lain seperti sifat hidrofobik dan peningkatan karakteristik penggilingan yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa yang tidak melalui proses torefaksi (Nunes *et al.*, 2014).

2.8. Parameter Ukuran dan Ketahanan Pelet

Nilai *moisture content* (MC) disebabkan oleh tekanan yang diberikan selama pembakaran pelet kayu (*wood pellet*). Tekanan yang cukup besar selama produksi *wood pellet* menyebabkan biopelet menjadi lebih padat, halus, dan seragam, yang memungkinkan partikel biomassa menempel pada permukaan atau ruangan yang berpori dan menyebabkannya rentan terhadap habitat mikroba (Fitrani *et al.*, 2018). Ukuran partikel dalam pelet kayu semakin besar, begitu pula dengan ukuran abunya. Hal ini disebabkan ukuran *wood pellet* yang agak berbeda (Arshad, 2014).

Saat menganalisis masalah daya tahan pelet, konsep ini juga harus ditentukan. Daya tahan adalah fitur kualitas yang termasuk dalam parameter mekanis bahan bakar padat. Itu juga merupakan parameter kualitas fisik utama yang dipertimbangkan oleh industri (José-Vicente *et al.*, 2016). Ini dapat didefinisikan sebagai ketahanan bahan bakar terhadap guncangan atau abrasi yang dihasilkan selama proses yang berkaitan dengan distribusi dan transportasi. Menurut Tabil *et al.* (1996), daya tahan mekanik berarti kemampuan pelet untuk menahan beban dan kekuatan yang merusak selama transportasi, penyimpanan dan penanganan.

Daya tahan pelet yang rendah tidak diinginkan, karena, seperti yang disebutkan sebelumnya jika pelet mudah hancur, dapat menyebabkan masalah kotoran di kompor, menyebabkan gangguan dalam sistem pemberian pelet otomatis, mungkin juga masalah efisiensi pembakaran yang berkurang dan peningkatan emisi (José-Vicente *et al.*, 2016; Liswoski *et al.*, 2015; Zafari *et al.*, 2012). Daya tahan juga dapat ditentukan dengan metode lain yang menggunakan berbagai ukuran sampel, wadah, kecepatan rotasi, waktu pemuatan, atau saringan untuk pemisahan penghancuran (Lehtikangas, 2001; Ahn *et al.*, 2014; Gaham *et al.*, 2016). Metode biasanya dipilih sesuai dengan kebutuhan spesifik seperti yang diharapkan, juga memberikan hasil yang bervariasi. Metode yang digunakan memiliki pengaruh terhadap variabilitas hasil, tetapi tentunya juga bergantung pada *biofuel* yang diuji (Temmerman *et al.*, 2006; Abdulmumini *et al.*, 2020).

Karena standarisasi pelet kayu di Indonesia telah mempunyai standar mutu dalam negerinya sendiri, standar ini merupakan standar minimum untuk pelet biomassa yang baru diproduksi. Parameter kulaitas pelet biomassa dari berbagai negara dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar mutu pelet biomassa

No	Parameter	SNI 8675		DIN	KFS 2013			JIS		
		(Indonesia)		51 731	(Korea)			(Jepang)		
		Pertama	Kedua	(Jerman)	G1	G2	G3	A1	A2	B
1	Diameter (mm)	-	-	4 – 10		6 - 8		6 ±1 atau 8±1		
2	Panjang (mm)	-	-	≤ 50		≤ 32		31,5 < x ≤ 40		
3	Kerapatan (kg/m ³)	≥0,8	≥0,6	>540	≥640	≥600	≥550	≥600		
4	Kadar Air (%)	≤12	≤10	≤12		≤10	≤15	≤10		
5	Kadar Abu (%)	≤5		<1,5	≤0,7	≤1,5	≤3	≤0,7	≤1,2	≤2
6	Kadar Zat Menguap (%)	≤75	≤80	-		-		-		
7	Karbon terikat (%)	≥14		-		-		-		
8	Nilai Kalor (MJ/kg)	≥16,5		17,5 ≤ x ≤ 19,5	≥18,00	≥18,00	≥16,90	≥16,5		

III. METODOLOGI

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Workshop Teknologi Hasil Hutan di Laboratorium Terpadu Fakultas Pertanian Universitas Lampung, Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung, dan Laboratorium Teknik Kimia Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lampung dari Oktober 2023 hingga Februari 2024.

3.2. Alat dan Bahan

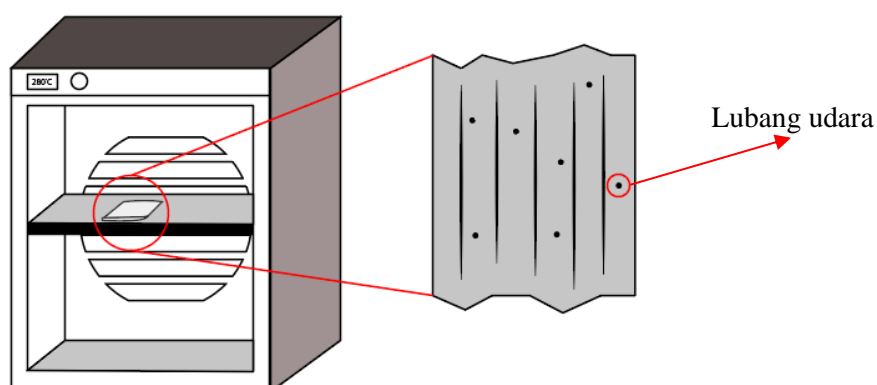
Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu jangka sorong digital dengan skala 0,01 mm, timbangan elektrik dengan skala 0,0001 g, aluminium foil, oven listrik (BJPX-Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia), *bomb calorimeter* (Oxygen Combustion Bombs, 1108 Oxygen Combustion Vessel, Parr Instrument Company, Moline, United States), *colorimeter* (AMT507, Amtast, Qingdao, China), dan perangkat pengujian universal (M500-50AT, Testometric, Rochdale, UK). Pelet sekam padi dan pelet kayu karet yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan secara komersial dari PT. IGJ Wood Pellet, Pancasila, Natar, Lampung Selatan, Lampung.

3.3. Bahan dan Langkah Kerja

Bahan penelitian ini didapatkan secara komersial yaitu pelet sekam padi dan kayu karet dibuat dengan mesin pelet. Pada tahap analisis, sekitar 100 g pelet biomassa yang akan digunakan sebagai sampel dan akan dianalisis karakteristiknya.

3.3.1. Proses Torefaksi

Bahan dikeringkan pada suhu $105 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 24 jam sebelum dilakukan torefaksi. Perlakuan torefaksi dilakukan di Workshop Teknologi Hasil Hutan, Laboratorium Lapang Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, dengan menggunakan oven listrik (BJPX-Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia) pada suhu 280°C selama 50 menit. Metode ini mengacu pada penelitian Pah *et al.* (2021) dan Saputra *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa suhu optimal untuk melakukan proses torefaksi adalah pada suhu 280°C dengan waktu 40-50 menit. Pelet torefaksi dari setiap jenis disiapkan dalam 12 bar, ditutup dengan aluminium foil, dan dilubangi pada bagian sisinya dengan beberapa lubang seukuran jarum agar uap air dapat keluar (Gambar 6). Oven listrik diatur pada suhu 280°C , dan tambahan 20°C ditambahkan karena suhu akan menurun setelah tutup oven dibuka. Setelah oven mencapai suhu 280°C , pelet dimasukkan ke dalam dan diberi waktu. Pelet dikeluarkan dari oven dan dibiarkan dingin hingga mencapai suhu ruang, biasanya antara 20°C dan 30°C . Untuk mencegah pelet terbakar, pelet ditutup dengan kain setelah 50 menit.



Gambar 6. Proses torefaksi dengan oven

3.4. Pengujian Sifat Fisis

3.4.1. Perubahan Warna

Sebelum dan sesudah torefaksi, uji perubahan warna dilakukan dengan menggunakan *colorimeter* (AMT507, Amtast, Qingdao, China) yang dilengkapi dengan sistem CIE-Lab. Tiga pengukuran acak dilakukan pada tumpukan sampel. Pengujian ini menggunakan parameter L^* , a^* , dan b^* . Simbol L^*

merepresentasikan tingkat kecerahan, dengan nilai minimum 0 (gelap sempurna) dan nilai maksimum 100 (cerah sempurna). Simbol a^* adalah representasi kromatisitas merah/hijau, dengan nilai positif adalah merah dan nilai negatif adalah hijau. Simbol b^* adalah representasi kromatisitas kuning/biru, dengan nilai positif adalah kuning dan nilai negatif adalah biru (Hidayat *et al.*, 2017). Perubahan warna secara keseluruhan (ΔE^*) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

di mana ΔE^* adalah perubahan warna secara keseluruhan, ΔL^* adalah perubahan kecerahan, Δa^* adalah perubahan kromatisitas merah/hijau, dan Δb^* adalah perubahan kromatisitas kuning/biru. Nilai ΔE^* digunakan untuk menentukan tingkat perbedaan warna yang dirasakan. Klasifikasi dari perubahan warna dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi perubahan warna

No	Nilai Klasifikasi	Deskripsi
1	$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$	Bisa diabaikan
2	$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	Bisa dirasakan sedikit
3	$1,5 < \Delta E^* \leq 3$	Dapat terlihat
4	$3 < \Delta E^* \leq 6$	Cukup besar
5	$6 < \Delta E^* \leq 12$	Sangat berubah
6	$\Delta E^* > 12$	Berubah total

(Valverde dan Moya, 2014)

3.4.2. Kerapatan

Selanjutnya, ukuran dan diameter disesuaikan untuk menentukan volume. Untuk menentukan kerapatan maksimum dari setiap sampel uji pelet kayu menggunakan standar ASTM E 873-82 (2019) dengan rumus, nilai berat dan volume kering oven dari sampel uji:

$$K = \frac{B}{V}$$

Keterangan:

K = Kerapatan (g/cm^3)

B = Berat sampel (g)

V = Volume sampel (cm^3)

Kerapatan kering tanur didapatkan dari perbandingan antara berat dan volume briket setelah briket dioven dengan suhu 100°C selama 24 jam (Bazanet *et al.*, 2021). Kepadatan digambarkan sebagai hasil rasio volume terhadap berat sampel uji. Setiap pengujian dihitung menggunakan neraca analitik dalam kondisi kering oven (BJPX - Summer, PT Innotech System, Jakarta, Indonesia).

3.4.3. Uji Ketahanan Air

Pengujian ketahanan air dilakukan dengan merendam pelet yang telah dikeringkan dalam oven selama 24 jam tanpa perendaman selama 0 m, 1 m, 5 m, 30 m, 1 j, 6 j, 12 j, 24 j, 48 j, dan 72 j di mana m dalam menit dan j dalam jam. Pengamatan ini mengevaluasi perubahan fisik dan visual yang disebabkan oleh perendaman dalam air. Pelet yang telah ditorekasi lebih tahan terhadap air atau bersifat hidrofobik (Rubiyanti *et al.*, 2019). Pengamatan ini menunjukkan waktu pelet menyerap air dan secara visual menunjukkan bagaimana pelet secara alami dapat disimpan jika terendam air.

3.5. Pengujian Sifat Mekanis

Pengujian kuat tekan dapat digunakan persamaan berikut untuk menghitung nilainya:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

σ = Kuat tekan (N/mm^2)

P = Uji tekan maksimum (N)

A = Luas permukaan sampel (mm^2)

Kekuatan tekan adalah sifat mekanik yang diukur. Pengujian dilakukan dengan mesin uji universal (UTM) M500-50AT. Mesin menekan pelet, menghitung waktu yang dibutuhkan untuk pecah atau retak, setelah pelet

diratakan di semua sisi sebelum diletakkan secara vertikal pada logam UTM. Setelah itu, mesin secara otomatis berhenti dan menampilkan grafik yang menunjukkan nilai maksimum dari tes.

3.6. Uji Penyerapan Kelembaban

Uji penyerapan kelembaban dilakukan pada suhu ruang selama 30 hari menggunakan rumus kadar air. Selama periode 30 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 penyerapan air pada setiap jenis pelet. Perhitungan kadar air dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{a-b}{b} \times 100\%$$

di mana a adalah berat kering udara (g) dan b adalah berat kering oven pada suhu $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam (g).

3.7. Pengujian Proksimat

Untuk mendapatkan nilai berat kering oven $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, sampel sebanyak 5 g dikeringkan secara langsung di dalam oven (BJPX-Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia) dan didinginkan hingga massa sampel tetap. Sampel sebanyak 5 g dikeringkan secara langsung dalam oven (BJPX - Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia) untuk mendapatkan nilai berat kering oven yang ditetapkan pada suhu $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam dan didinginkan hingga massa sampel tetap. Prosedur untuk menghitung MC menggunakan standar ASTM E 871-82 (2019). Menggunakan perhitungan MC:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{a-b}{b} \times 100\%$$

di mana a adalah berat kering udara (g) dan b adalah berat kering oven pada suhu $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam (g). Menimbang 2 g bahan uji ke dalam cawan porselen dengan berat yang diketahui dan menyegelnya memungkinkan seseorang

untuk menentukan kandungan VM. Cawan sampel uji ditempatkan dalam *furnace* (Thermo Scientific FB1410M-33, Ashville, United States) dan dipanggang selama tujuh menit pada suhu $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$. Setelah semua proses selesai, sampel dan cawan ditempatkan di dalam tungku. Selanjutnya, sampel ditempatkan di dalam desikator selama dua menit dan kemudian diturunkan secara berurutan. Penentuan kandungan *volatile matter* (VM) pelet kayu dengan menggunakan rumus berikut dan standar ASTM E 872 (2013):

$$\text{Kadar zat menguap (\%)} = \frac{b-c}{b} \times 100\%$$

di mana b adalah berat kering oven pada suhu $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ selama 24 jam (g) dan c adalah berat sampel setelah pemanasan pada suhu $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$ selama 7 menit (g). Prosedur untuk menghitung kadar abu dilakukan dengan memasukkan 2 g sampel ke dalam cawan porselen yang telah ditentukan beratnya. Cawan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* (Thermo Scientific FB1410M-33, Ashville, Amerika Serikat) pada suhu 815°C selama dua jam. Ketika asap berhenti, yang menandakan adanya karbon, tutup tungku diturunkan selama satu menit untuk memastikan bahwa proses pelindian berlangsung dengan benar. Ketika semua sampel uji telah berubah menjadi abu, cawan ditambahkan ke penunjuk dan digabungkan dengan abu untuk membentuk berat cawan. Perhitungan kadar abu pelet kayu menggunakan standar ASTM D 1102-84 (2008) dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{d}{b} \times 100\%$$

di mana b adalah berat kering oven pada suhu $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ selama 24 jam (g), dan d adalah berat setelah pemanasan pada suhu 580 hingga 600°C (g). ASTM D 1762-84 (2013) adalah standar yang digunakan dalam prosedur perhitungan FC. FC diperoleh melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Kadar karbon terikat (\%)} = 100\% - (\text{kadar zat menguap} + \text{kadar abu}) (\%)$$

kadar karbon terikat didapatkan dengan hasil uji menggunakan *furnace* (Thermo Scientific FB1410M – 33, ASHEVILLE, United States).

3.8. Pengujian Nilai Kalor

Perhitungan kalori menggunakan contoh uji 1 g yang diletakkan pada *sample holder*. Benang 10 cm ke atas disulut menggunakan kawat, kemudian kepala *bomb* dimasukkan ke dalam wadah *bomb* menggunakan *bomb calorimetric* (Oxygen Combustion Bombs, 1108 Oxygen Combustion Vessel, Parr Instrument Company, Moline, United States) dan diledakkan. Saat suhu udara tetap sama, pembakaran dimulai. Pengukuran dilakukan secara optimal. Setelah penggunaan termometer dan benang panjang yang terbakar oleh panas yang meledak, contoh uji kemudian dititrasi. Tata cara penghitungan nilai kalor pelet kayu menggunakan standar SNI 01-6235:2000. Nilai kalor total dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Nilai Kalor (CV)} = \frac{t w - I_1 - I_2 - I_3}{b}$$

di mana t adalah temperatur yang meningkat ($^{\circ}\text{C}$), w adalah 2426 (cal/ $^{\circ}\text{C}$), I_1 adalah natrium karbonat yang digunakan untuk titrasi (ml), I_2 adalah $13.7 \times 1.02 \times$ berat sampel (g), I_3 adalah koreksi titrasi (J), dan b adalah berat oven-kering pada suhu $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam (g). Nilai kalor diukur pada *bomb calorimetric* pada kondisi saat ini dengan bantuan oksigen.

3.9. Hasil Produk Padat

Tiga parameter digunakan untuk mengevaluasi hasil torefaksi, yaitu hasil massa (MY), rasio nilai energi, dan hasil energi (EY). Nyakuma *et al.* (2015) melaporkan, densitas energi (ED) adalah nama lain dari rasio energi. Rumus berikut ini, yang disarankan oleh Uemura *et al.* (2013), digunakan untuk menghitung ketiga parameter tersebut:

$$\text{MY} = \frac{m_t}{m_o} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{ED} = \frac{CV_t}{CV_o} \quad (2)$$

$$\text{EY} = \text{MY} \times \text{ED} = \left(\frac{m_t \times CV_t}{m_i \times CV_i} \right) \times 100\% \quad (3)$$

di mana m adalah massa pelet dan CV adalah nilai kalor pelet. Simbol o adalah untuk pelet kering oven dan t untuk pelet yang ditorefaksi.

3.10. Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Kualitas biomassa dan perubahan gugus fungsi diukur melalui Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR), yang dilakukan dengan metode Kalium Bromida (KBr) dan spektroskopi *fourier transform infrared* (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, Amerika Serikat). Prinsip kerja spektrum FTIR adalah inframerah melewati celah sampel dan dikontrol oleh celah tersebut. Beberapa inframerah diserap oleh sampel, dan yang lain ditransmisikan melalui permukaan sampel. Selanjutnya, sinar inframerah dikirim ke detektor, yang mengukur sinyal. Selanjutnya, sinyal ini diolah ke komputer.

3.11. Analisis Data

Analisis data memperoleh nilai rata-rata, maksimum, dan minimum untuk menganalisis data, standar deviasi untuk menentukan karakteristik, dan menghasilkan informasi tentang hasil dari setiap variabel penelitian melalui analisis statistik, deskriptif, dan komparatif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Pada sifat fisik pelet yang tidak ditorefaksi memiliki warna yang lebih cerah. Nilai kerapatan pada kondisi kering udara lebih besar. Pelet kayu karet memiliki nilai kuat tekan yang lebih baik daripada pelet sekam padi. Pelet torefaksi menunjukkan bentuknya yang masih utuh sampai 24 jam lebih. Kandungan proksimat seperti kadar air pada pelet kayu karet dan pelet sekam padi yang ditorefaksi sebesar 3,40% dan 3,12%, zat menguap 78,79% dan 62,00%, kadar abu 2,52% dan 17,28%, serta karbon terikat 18,69% dan 22,72%. Nilai kalor pada pelet kayu karet dan sekam padi yang ditorefaksi sebesar 19,89 MJ/kg dan 21,15 MJ/kg. Torefaksi menyebabkan perubahan gugus fungsi seperti gugus OH, C-H, N-H, C=O, P=O, dan C-O-C dengan analisis FTIR.
2. Perubahan warna (ΔE^*) pelet yang ditorefaksi lebih hitam yang disebabkan oleh penurunan kadar air dan adanya pendegradasian pada gugus kimia. Kerapatan kering udara dan kering oven pada pelet berkurang setelah ditorefaksi. Pelet yang ditorefaksi menunjukkan ketahanan air yang lebih baik daripada yang tidak ditorefaksi. Adsorpsi kelembaban air pelet sekam padi dan pelet kayu karet yang ditorefaksi cenderung lebih stabil daripada pelet yang tidak ditorefaksi yang menunjukkan sifat hidrofobik yang lebih tinggi. Kadar air menurun drastis setelah ditorefaksi. Setelah proses torefaksi nilai kadar abu pelet kayu karet menurun dan sebaliknya kadar abu pelet sekam padi meningkat. Nilai zat mudah menguap sekam padi menurun dikarenakan tidak banyak senyawa yang terurai saat proses torefaksi dan

nilai zat menguap kayu karet meningkat. Dengan adanya perlakuan torefaksi nilai karbon terikat meningkat. Pelet yang ditorefaksi menunjukkan peningkatan nilai kalor yang tinggi dimana pengaruh terbesarnya dari penurunan kadar air dan peningkatan karbon terikat yang cukup signifikan. Setelah ditorefaksi pada analisis FTIR gelombang pada kedua jenis pelet mengalami perenggangan.

3. Pelet kayu karet dan sekam padi yang diuji telah memenuhi standar dimensi panjang dan diameter dari ke empat negara. Kadar air pada kedua jenis pelet baik sebelum atau sesudah torefaksi telah memenuhi standar dari ke empat negara. Setelah ditorefaksi nilai zat mudah menguap sekam padi menurun dikarenakan tidak banyak senyawa yang terurai saat proses torefaksi dan nilai zat menguap kayu karet meningkat, namun keduanya masih belum memenuhi standar dari SNI. Setelah proses torefaksi nilai kadar abu kayu karet menurun masih belum memenuhi standar negara Jepang, Korea, dan Jerman sebaliknya kadar abu pelet sekam padi justru meningkat dan jauh dari standar ke empat negara. Pelet yang ditorefaksi menunjukkan peningkatan nilai kalor yang tinggi sehingga keduanya memenuhi standar dari keempat negara. Dari perhitungan hasil produk padatan kedua jenis pelet layak untuk ditorefaksi dimana nilai hasil energinya lebih dari 80%.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan diperlukannya penelitian lebih lanjut seperti perbedaan durasi antara 40 menit sampai 60 menit dan suhu 200°C sampai 300°C dalam proses torefaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulmumini, M. M., Zigan, S., Bradley, M. S. A., dan Lestander, T. A. 2020. Fuel pellet breakage in pneumatic transport and durability tests. *Renew. Energy* 157: 911–919.
- Abdulyekeen, K.A., Umar, A.A., Patah, M.F.A., dan Daud, M.W.A.W. 2021. Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150.
- Adeleke, A.A., Odusote, J.K., Ikubanni, P.P., Lasode, O.A., Malathi, M., dan Paswan, D. 2021. Essential basics on biomass torefaksi, densification and utilization. *International Journal of Energy Research*. 45(2): 1375–1395.
- Adrian, A., Sulaeman, R., dan Oktorini, Y. 2015. Karakteristik wood pellet dari limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*. Arg) sebagai alternatif sumber energi terbarukan. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Riau* 2(2): 1–6.
- Ahmed, S., Rakib, M., dan Hemayet, M. 2021. Effect of total mixed ration based complete pellet feed on the performances of stallfed native sheep. *SAARC Journal of Agriculture* 18(2): 157–166.
- Ahn, B. J., Chang, H., Lee, S. M., Choi, D. H., Cho, S. T., Han, G., dan Yang, I. 2014. Effect of binders on the durability of wood *pellets* fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renew. Energy* 62: 18–23.
- Aji, S., Muchammad, M., dan Iskandar, N. 2022. Karakterisasi pelet biomassa berbahan cocopeat sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Teknik Mesin* 10(4): 575-580.
- Ajimotokan, H. A., Ehindero, A. O., Ajao, K. S., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., dan Shuaib-Babata, Y.L. 2019. Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African* 6: 1–12.

- Alamsyah, R., Siregar, N.C., dan Hasanah, F. 2017. Torrefaction study for energy upgrading on Indonesian biomass as low emission solid fuel. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 65(1).
- Aljarwi, M. A., Pangga, D., dan Ahzan, S. 2020. Uji laju pembakaran dan nilai kalor briket wafer sekam padi dengan variasi tekanan. *Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika* 6(2): 1-9.
- Alwan, H., Irawan, A., Santika, dan Nurindah, E. 2020. Performance test of biomass cookstove with torrefied rice husk as fuel using water boiling test method. *World Chemical Engineering Journal* 4(1): 1-10.
- Álvarez, A., Migoya, S., Menéndez, R., Gutiérrez, G., Pizarro, C., dan Bueno, J.L. 2021. Torrefaction of short rotation coppice willow. Characterization, hydrophobicity assessment and kinetics of the process. *Fuel* 295: 1–9.
- American Society for Testing and Materials. 2008. *Standard Test Method for Ash in Wood*. ASTM D 1102-84.
- American Society for Testing and Materials. 2012. *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter*. ASTM E 711-87.
- American Society for Testing and Materials. 2013. *Standard Methods for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. ASTM D 1762-84.
- American Society for Testing and Materials. 2013. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*. ASTM E 872.
- American Society for Testing and Materials. 2019. *Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels*. ASTM E 873-82.
- American Society for Testing and Materials. 2019. *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*. ASTM E 871-82.
- Apriani. 2015. *Uji Kualitas Biobriket Ampas Tebu Dan Sekam Padi Sebagai Bahan Bakar Alternatif*. Universitas Islam Negeri Makassar. Makassar.
- Apriyanto, A., dan Tohirin, M. 2022. Kaji eksperimental konversi biomassa sampah menjadi bahan bakar terbarukan menggunakan proses torefaksi. *Jurnal Ilmu Teknik* 7(1): 43-52.
- Aristiyanto, E. Y., dan Palupi, A. E. 2014. Pembuatan biobriket dari campuran limbah kulit pisang dan serbuk gergaji menggunakan perekat tetes tebu. *Jurnal Teknik Mesin* 3(1): 89-95.
- Arriola, E., Chen, W. H., Chih, Y. K., De Luna, M. D., dan Show, P. L. 2020. Impact of post-torefaksi process on biochar formation from wood pellets and self-heating phenomena for production safety. *Energy* 207: 1–13.

- Arziyah, D., Yusmita, L., dan Ariyetti, A. 2019. Analisis mutu tahu dari beberapa produsen tahu di Kota Padang. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas* 23(2): 143-148.
- Asfar, A. M. I. A., Thaha, S., Kurnia, A., Nurannisa, A., Ekawati, V.E., dan Dewi, S.S. 2021. Hiasan dinding estetika dari limbah sekam padi. *Indonesian Journal of Community Service* 1(3): 249- 259.
- Asmara, S., Tamrin, Purba, F.J.K., Suri, I.F., dan Hidayat, W. Production and Characterization of Bio-Briquettes from the Cassava Stems and Bamboo Charcoal Bonded with Organic Adhesive. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 18(2): 407-413
- Awoyemi, L., dan Jones, I.P. 2011. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. *Wood Sci. Tech* 45(2): 261-267.
- Bach, Q.V., dan Skreiberg, Ø. 2016. Upgrading biomass fuels via wet torefaksi: a review and comparison with dry torefaksi. *Renew Sustain Energy Rev* 54: 665–677.
- Badan Standar Nasional. 2000. SNI 01-6235. Briket arang kayu. Badan Standar Nasional, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standarisasi Nasional. 2018. *Pelet biomassa untuk energi*. SNI 8675.
- Bahanawan, A., dan Krisdianto. 2020. Pengaruh pengeringan terhadap perubahan warna, penyusutan tebal, dan pengurangan berat empat jenis bambu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 38(2): 69–80.
- Basu, P. 2018. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 3rd Edition, Elsevier: Academic Press.
- Bates, R.B., dan Ghoniem, A.F. 2012. Biomass torefaksi: modeling of volatile and solid product evolution kinetics. *Bioresour Technol* 124: 460–469.
- Bazenet, R.A., Hidayat, W., Ridjayanti, S.M., Riniarti, M., Banuwa, I.S., Haryanto, A., dan Hasanudin, U. 2021. Pengaruh Kadar Perekat Terhadap Karakteristik Briket Arang Limbah Kayu Karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* 10(3): 283-295.
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., dan Kiel, J.H.A. 2005. *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*. BIOCOAL: Netherlands.
- Boerhendhy, I., Hadjib, N., Siagian, R.M., Gunawan, A., dan Lasminingsih, M. 2001. Karakteristik mutu dan sifat kayu karet klon anjuran dan harapan. Prosiding Lokakarya Nasional Pemuliaan Karet. Pusat Penelitian Karet, Medan. 1-26.

- Bradna, J., Malat'ák, J., dan Hájek, D. 2016. The properties of wheat straw combustion and use of fly ash as a soil amendment. *Agronomy Research* 14(4): 1257–1265.
- Butler, J.H.A., dan Buckerfield, J.C. 1979. Digestion of lignin by termites. *Soil Biology and Biochemistry* 11(5): 507-513.
- Candan, Z., Korkut, S., dan Unsal, O. 2013. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. *Ind. Crop. Prod* 45: 461–464.
- Chen, W.H., dan Kuo, P.C. 2010. A study on torefaksi of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* 35(6): 2580–2586.
- Chen, W.H., Peng, J., dan Bi, X.T. 2015. A state-of-the-art review of biomass torefaksi, densification and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev* 44: 847-866.
- Chen, W.H., Lin, B.J., Colin, B., Pétrissans, A., dan Pétrissans, M. 2019. A study of hygroscopic property of biomass pretreated by torrefaction. *Energy* 158: 32–36.
- Civitarese, V., Acampora, A., Sperandio, G., Assirelli, A., dan Picchio, R. 2019. Production of Wood Pellets from Poplar Trees Managed as Coppices with Different Harvesting Cycles. *Energies* 12: 2973.
- Dai, L., He, C., Wang, Y., Liu, Y., Yu, Z., Zhou, Y., Fan, L., Duan, D., dan Ruan, R. 2017. Comparative study on microwave and conventional hydrothermal pretreatment of bamboo sawdust: Hydrochar properties and its pyrolysis behaviors. *Energy Conversion and Management* 146: 1–7.
- Dias, G. M., Ayer, N. W., Kariyapperuma, K., Thevathasan, N., Gordon, A., Sidders, D., dan Johannesson, G.H. 2017. Life cycle assessment of thermal energy production from short-rotation willow biomass in southern Ontario, Canada. *Appl. Energy* 204: 343–352.
- Direktorat Jendral Perkebunan. 2017. Statistik Perkebunan Karet di Indonesia tahun 2015 – 2017.
- Djaenuddin, D., Marwan, H., Subagyo, H., Mulyani, A., dan Suharta, N. 2000. Kriteria Kesesuaian Lahan untuk Komoditas Pertanian. Departemen Pertanian.
- Doshi, U.H., dan Bhad-Patil, W.A. 2011. Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 139(1): 74-79.
- Driver, T., Bajhaiya, A. K., Allwood, W., Goodacre, R., Pittman, J. K., dan Dean, A. P. 2015. Metabolic responses of eukaryotic microalgae to

environmental stress limit the ability of FTIR spectroscopy for species identification. *Algal Research* 11:148–55.

Duygu, D. Y., Udoh, A. U., Ozer, T. B., Akbulut, A., Erkayal, I. A., Yildizl, K., dan Guler, D. 2012. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for identification of *Chlorella vulgaris* Beijerinck 1890 and *Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing 1833. *Afr J Biotechnol* 11(16): 3817–3824.

Dyjakon, A., Noszczyk, T., dan Smędzik, M. 2019. The influence of torefaksi temperature on hydrophobic properties of waste biomass from food processing. *Energies* 12(24): 4609.

European Pellet Council. 2011. Handbook for the Certification of Wood *Pellets* for Heating Purposes, European *Pellet* Council, Brussels, Belgium.

Febryanti, dan Yulhendra, D. 2019. Analisis penentuan kualitas batubara berdasarkan uji proksimat di PT. Pelabuhan Universal Sumatera Kabupaten Muaro Jambi, Provinsi Jambi. *Jurnal Bina Tambang* 7(3): 143-150.

Ferreira, A. F., Soares, D. A. P., Silva, C. M., dan Costa, M. 2015. Evaluation of thermochemical properties of raw and extracted microalgae. *Energy* 92: 365–372.

Firdhaus, A., Yuniyanto, B., dan Muchammad. 2023. Analisis karakteristik pelet biomassa berbahan dasar kayu dengan campuran zat perekat anorganik. *Jurnal Teknik Mesin* 11(2): 187-190.

Gaham, S., Ogunfayo, I., Hall, M.R., Snape, C., Quick, W., Weatherstone, S., dan Eastwick, C. 2016. Changes in mechanical properties of wood *pellets* during artificial degradation in a laboratory environment. *Fuel Process. Technol.* 148: 395–402.

Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C.J., Bi, X., Kim, C.S., dan Sokhansanj, S. 2014. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torefaksi before or after densification? *Appl. Energy* 134:133–142.

Giacomo, G. D. 2009. Renewable energy benefits with conversion of woody residues to *pellets*. *Energy* 34 (5): 724-731.

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

Hamidah, L. N., dan Rahmayant. 2017. A. Optimasi kualitas briket biomassa padi dantongkol jagung dengan variasi campuran sebagai bahan bakar alternatif. *Journal of Research and Technology* 3(2): 70-79.

Haryadi. 2006. *Teknologi Pengolahan Beras*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

- Haryanti, N. H., Suryajaya, S., Wardhana, H., dan Noor, R. 2019. Utilization of coal bottom ash as briquette material. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 4(3): 113–124.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., dan Yoo, J. 2021. Valorization of Indonesian Wood Wastes through Pyrolysis. *Energies* 14: 1-25.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., dan Hidayat, W. 2021. Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: Potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 8(1): 33–42.
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D.A., Triyono, S., Amrul, dan Wisnu, F.K. 2020. Torréfaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 749 012047
- Hasna, A. H., Sutapa, J. P. G., dan Irawati, D. 2019. Pengaruh Ukuran Serbuk dan Penambahan Tempurung Kelapa Terhadap Kualitas Pelet Kayu Sengon. *Jurnal Ilmu Kehutanan* 13: 170-180.
- Hendra, D. 2012. Rekayasa pembuatan mesin pelet kayu dan pengujian hasilnya. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 30(2): 144–154.
- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S.H., dan Kim, N.H. 2015. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. *BioResources* 10(4): 6961–6974.
- Hidayat, W., Pah, J.M., Suryanegara, L., Hasanudin, U., Haryanto, A., dan Wulandari, C. Production and characterization of andong bamboo (*Gigantochloa pseudoarundinacea* (steudel) widjaja) pellets from various stem parts. *Jurnal Teknik Pertanian* 11(4): 713-723
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H.M., Kondo, T., dan Kim, N.H. 2017. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University* 62(1): 145–152.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Park, B.H., Banuwa, I.S., Febrianto, F., dan Kim, N.H. 2017. Color change and consumer preferences towards color of heat-treated korean White Pine and Royal Paulownia Woods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 45(2): 213-222.
- Hidayat, W., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., dan 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., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D.A., Haryanto, A., Amrul, Yoo, J., Kim, S., Lee, S., dan Hasanudin, U. 2021. Effects of torrefaction using COMB dryer/pyrolizer on the properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Jabon (*Anthocephalus cadamba*) pellets. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB)*.
- Hidayat, W., Wijaya, B.A., Saputra, B., Rani, I.T., Kim, S., Lee, S., Yoo, J., Park, B.B., Suryanegara, L., dan 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.
- Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y., dan Pichette, A. 2012. A spectrophotometric and chemical study on color modification of heat-treated wood during artificial weathering. *Applied Surface Science* 258(14): 5360–5369.
- Hutomo, H. D., Swastawati, F., dan Rianingsih, L. 2015. Pengaruh konsentrasi asap cair terhadap kualitas dan kadar kolestrol belut (*Monopterus albus*) Asap. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan* 4(1): 7-14.
- Iskandar. 2018. Analisis Produksi Tanaman Karet di Kabupaten Aceh Tamiang 85 Analisis Produksi Tanaman Karet Di Kabupaten Aceh Tamiang Iskandar. *Jurnal samudra ekonomika* 2(1): 85-96.
- Iryani, D.A., Halimatuzzahra, Taharuddin, Haryanto, A., Hidayat, W., dan Hasanudin, U. 2023. Physicochemical Characterization of Wood Mixed with Coffee Waste Pellet. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1187 012007
- Jannah, B.L., Pangga, D., dan Ahzan, S. 2022. Pengaruh Jenis dan Persentase Bahan Perikat Biobriket Berbahan Dasar Kulit Durian terhadap Nilai Kalor dan Laju Pembakaran. *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika* 10(1): 16-23.
- Jianfeng, Shuguang, Xinzhi, Houlei dan Junjie. 2010. The Prediction of Elemental Composition of Biomass Based on Proximate Analysis. *Jurnal Energi Conversion and Management* 5: 983- 987.
- José-Vicente, O.-V., Enrique, G.A., dan Patricia, G. 2016. Analysis of durability dan dimensional stability of hydrothermal carbonized wooden *pellets*. *Wood Res* 61: 321–330.
- Kambo, H.S., dan Dutta, A. 2014. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torefaksi and hydrothermal carbonization. *Applied Energy* 135: 182–191.
- Kasmaniar, Yana, S., Nelly, Fitriliana, Susanti, Hanum, F., dan Rahmatullah, A. Pengembangan energi terbarukan biomassa dari sumber pertanian,

perkebunan dan hasil hutan: Kajian pengembangan dan kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering* 8(1): 4957-4964.

- Keivani, B., Gultekin, S., Olgun, H., dan Atimtay, A.T. 2018. Torefaksi of pine wood in a continuous system and optimization of torefaksi conditions. *International Journal of Energy Research* 42(15): 4597–4609.
- Klepcka, W., dan Florkowski. 2019. The wood *pellet* sector: barriers to growth and opinions of manufacturers in Poland Zesz. Nauk. SGGW w Warszawie - Probl. Rol. Światowego 19(4): 9-1.
- Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., dan Lymperis, C. 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management* 32(3): 372-381.
- Kurniawan, E.W., Amirta, R., Budiarmo, E., dan Arung, E.T. 2017. Mixing of acacia bark and palm shells to increase caloric value of palm shells white charcoal briquette. *AIP Conference* 1854(1): 1-4.
- Kurnijasanti, R. 2016. Hasil analisis proksimat dari kulit kacang yang difermentasi dengan probiotik biomchemical. *Jurnal AGOVETERINER* 5(1): 28-33.
- Kusumawardi, M.R., dan Hamzah, F.H. 2018. Karakteristik sifat fisika batang karet non produktif characteristics of physical properties of non-productive rubber as materials. *Jurnal Online Mahasiswa* 5(2): 1-11.
- Lamers, P., Hoefnagels, R., Junginger, M., Hamelinck, C., dan Faaij, A. 2015. Global solid biomass trade for energy by 2020: An assessment of potential import streams and supply costs to North-West Europe under different sustainability constraints. *GCB Bioenergy* 7(4): 618–634.
- Lange, J.P. 2007. Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 1(1): 39-48.
- Laschi, A., Marchi, E., dan González-García, S. 2016. Environmental performance of wood pellets production through life cycle analysis. *Energy* 103: 469–480.
- Lee, X.J., Lee, L.Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., dan Ng, H.K. 2017. Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. *Bioresour Technol* 236: 155–63.
- Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of *pelletised* sawdust, logging residues and bark. *Biomass Bioenergy* 20: 351–360.
- Leskinien, P., Cardellini, G., Gonzalez-Garcia, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppala, J., Smyth, C., Stern, T., dan Verkerk, P. 2018. *Substitution Effects of Wood-Based Products in Climate Change Mitigation*, From Science to Policy 7. EFI: Joensuu, Finland.

- Lestari, R.Y., Prabawa, I.D.G.P., dan Cahyana, B.T. 2019. Pengaruh kadar air terhadap kualitas pelet kayu dari serbuk gergajian kayu Jabon dan Ketapang. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 37(1): 1–12.
- Li, M.F., Li, X., Bian, J., Xu, J.K., Yang, S., dan Sun, R.C. 2015. Influence of temperature on bamboo torefaksi under carbon dioxide atmosphere. *Industrial Crops and Products* 76: 149–157.
- Liew, R.K., Nam, W., Chong, M., Phang, X., Su, M., dan Yek, P. 2017. Oil palm waste: an abundant and promising feedstock for microwave pyrolysis conversion into good quality biochar with potential multi-applications. *Process Saf Environ Protect* 115: 57–69.
- Liu, K. 2019. Effects of sample size, dry ashing temperature dan duration on determination of ash content in algae and other biomass. *Algal Research* 40: 1-5.
- Mafakheri, F., Adebajo, D., dan Genus, A. 2020. Coordinating biomass supply chains for remote communities: A comparative analysis of non-cooperative and cooperative scenarios. *Int. J. Prod. Res* 59: 4615–4632.
- Mamvura, T.A. dan Danha, G. 2020. Biomass torefaksi as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon* 6(3): 1-17.
- Mamvura, T.A., Pahla, G., dan Muzenda, E. 2018. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *South Africa Journal Chemical Engineering* 25: 1-12.
- Manouchehrinejad, M., dan Sudhagar, M. 2018. Torefaksi after pelletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass and bioenergy* 118: 93–104.
- Manurung, S. M., Rauf, A., dan Razali. 2013. Kajian total biomassa rerumputan dan pengaruhnya terhadap tata air tanah di daerah tangkapan air danau toba. Studi kasus di kecamatan silahisabungan kabupaten dairi *Jurnal Online Agoekoteknologi* 1(4): 1319- 1329.
- Maryenti, R., Komalasari, K., dan Helwani, Z. 2017. Pembuatan bahan bakar padat dari pelepah sawit menggunakan proses torefaksi pada variasi suhu waktu torefaksi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau* 4(1): 1–4.
- Mathew, J.T., Ndamitso, M., Otori, A.A., dan Shaba, E.Y. 2014. Proximate and Mineral Compositions of Seeds of some Conventional and Non-conventional Fruits in Niger State, Nigeria. *Academic Research International* 5(2): 113-118.
- Maulana, dan Syaifur, R. S. 2015. Pemetaan Potensi Sekam Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Kabupaten Jember. *Berkala Ilmiah Teknologi Pertanian* 1(1): 1-5.

- Maulani, Q., Riniarti, M., Duryat, dan Hidayat, W. 2024. Aplikasi biochar berbahan dasar limbah kayu meranti (*Shorea* spp.) untuk pertumbuhan mahoni (*Swietenia macrophylla*) menggunakan media tailing emas meranti (*Shorea* spp.) biochar application to mahoni (*Swietenia macrophylla*) growth in gold tailing media. *Gorontalo Journal Of Forestry Research* 7(1): 35-45
- Mauritio, P., Duryat, Riniarti, M., dan 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
- McKechnie, J., Saville, B., dan MacLean, H.L. 2016. Steam-treated wood pellets: Environmental and financial implications relative to fossil fuels and conventional pellets for electricity generation. *Appl. Energy* 180: 637–649.
- Mistry, B. D. 2009. *A Handbook of spectroscopic data chemistry (UV, IR, PMR, CNMR and Mass Spectroscopy)*. Jaipur, India: Oxford Book Company.
- Muhammad, D.R.A., Parnanto, N.H.R., dan Widadie, F. 2018. Kajian peningkatan mutu briket arang tempurung kelapa dengan alat pengering tipe rak berbahan bakar biomassa. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian* 6(1): 23–26.
- Muth, D. J., Langholtz, M. H., Tan, E. C., Jacobson, J. J., Schwab, A., Wu, M. M., Argo, A., Brandt, C. C., Cafferty, K. G., and Chiu, Y. W. 2014. Investigation of thermochemical biorefinery sizing and environmental sustainability impacts for conventional supply system and distributed pre-processing supply system designs. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 8: 545–567.
- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Lee, S., Kim, S., Kim, S., Chun, D., Choi, H., Im, H., Lim, J., Kim, K., Jun, D., Moon, J., dan Yoo, J. 2023. Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 176: 113193.
- Nasution, A.Y., Hiro, F., dan Tarigan, L. Analisa desain kompor biomassa berbahan bakar tempurung kelapa menggunakan ansys. *Jurnal Dinamis* 10(1): 22-29.
- Naviza, F., Winarno, G.D., Hidayat, W., dan Yuwono, S.B. 2023. Peluang keanekaragaman jenis biomas untuk energi biomas. *Gorontalo Journal Of Forestry Research* 6(2): 64-72
- Ngo, T.N.L.T., dan Chiang, K.Y. 2021. Co-thermal degradation characteristics of rice straw and sewage sludge. *Sustainable Environment Research* 31(1): 1–14.
- Niedzółka, I. dan Szpryngiel, M. 2014. Possibilities of using biomass for energy purposes. *Agric. Eng* 18: 155–164.

- Ningsih, E. P., dan Hermita, N. 2016. Pengaruh ketinggian tempat terhadap kandungan proksimat dan komposisi asam oksalat pada kulit umbi talas beneng (*Xanthasoma undipes* K. Kock) yang dibudidayakan. *Jur. Agoekotek* 8(2): 139 – 142.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., dan Catalão, J. P. S. 2014. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renew Sustain Energy Rev* 40: 153–160.
- Nurhilal, O., dan Suryaningsih, S. 2017. Karakterisasi Biobriket Campuran Serbuk Kayu dan Tempurung Kelapa. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*. 7(2): 13-16.
- Nyakuma, B.B., Ahmad, A., Johari, A., Abdullah, T.A.T., dan Oladokun, O. 2015. Torrefaction of pelletized oil palm empty fruit bunches. *The 21st International Symposium on Alcohol Fuels* (Gwangju, Korea).
- Pah, J.M., Suryanegara, L., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Wulandari, C., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., dan Hidayat, W. 2021. Product characteristics from the torrefaction of bamboo pellets in oxidative atmosphere. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019)* 202: 185–189.
- Pahlevi, M.R., Aryadi, W., dan Sunyoto. 2019. Pengaruh variasi komposisi bahan perekat terhadap karakteristik fisik dan mekanik briket limbah organik. *Jurnal Inovasi Mesin* 1(2): 37-43.
- Parinduri, L., dan Parinduri, T. 2020. Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology* 5(2): 88-92.
- Peng, J., Wang, J., Bi, X., Lim, C. J., Sokhansaj, S., Peng, H., dan Jia, D. 2015. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Processing Technology*. 129: 168–173.
- Pentananunt, R., Mizanur Rahman, A.N.M., dan Bhattacharya, S.C. 1990. Upgrading of biomass by means of torrefaction Author links open overlay panel. *Energy* 15(12): 1175-1179.
- Phanphanich, M., dan Mani, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* 102(2): 1246–1253.
- Pimchuai, A., Dutta, A., dan Basu, P. 2010. Torrefaksi of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy and Fuels* 24(9): 4638–4645.
- Pradnyaswari, J.N., Pongekun, P., Ridhana, I., dan Budiman. 2022. Barriers and opportunities of bio pellets fuel development in Indonesia: market demand and policy IOP Conf. Ser. *Earth Environ. Sci* 1: 997.

- Prins, M.J., Ptasincki, K.J., dan Janssen, F.J. 2006. Torefaksi of wood: Part 1. Weight loss kinetics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 77(1): 28-34.
- Proskurina, S. 2016. Logistical, economic, environmental and regulatory conditions for future wood pellet transportation by sea to Europe: the case of Northwest Russian seaports. *Renew. Sustain. Energy Rev* 56: 38-50.
- Purnawati, R., Febrianto, F., Wistara, I.N.J., Nikmatin, S., Hidayat, W., Lee, S.H., dan Kim, N.H. 2018. Physical and chemical properties of Kapok (*Ceiba pentandra*) and Balsa (*Ochroma pyramidale*) fibers. *J. Korean Wood Sci. Technol* 46(4): 393-401.
- Purnomo, C. E., Haryanto, A., Wisnu, F. K., dan Telaumbanua. M. 2022. Torefaksi Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Putar. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering* 1(1): 1-11.
- Putri, R. E., dan Andasuryani. 2017. Studi mutu briket arang dengan bahan baku limbah biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas* 21(2): 143-151.
- Qi, Y., Yang, C., Hidayat, W., Jang, J.H., dan Kim, N.H. 2016. Solid bioenergy properties of Paulownia tomentosa grown in Korea. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 44(6): 890-896.
- Qistina, I., Sukandar, D., dan Trilaksono. 2016. Kajian Kualitas Briket Biomassa dari Sekam Padi dan Tempurung Kelapa. *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian dan Pengembangan Ilmu Kimia* 2(2): 136-142.
- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., dan Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian* 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., dan Kim, S. 2023. Wood Pellet Driven-Biochar Characterization Produced at Different Targeted Pyrolysis Temperatures. *Jurnal Sylva Lestari* 11(3): 558–571.
- Riaz, S., Al-Abdeli, Y. M., Oluwoye, I., dan Altarawneh, M. 2022. Torefaksi of densified woody biomass: The effect of pellet size on thermochemical and thermophysical characteristics. *Bioenergy Research* 15(1): 544–558.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., dan Firmansyah, F. 2019. Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang - asap cair yang dihasilkan. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 20(1): 18-27.
- Ridjayanti, S.M., Bazenet, R.A., Banuwa, I.S., Riniarti, M., dan Hidayat, W. 2023. Karakteristik arang kayu karet (*Hevea brasiliensis*) yang diproduksi menggunakan dua tipe tungku pirolisis. *Jurnal Belantara* 6(1): 12-22

- Ridjayanti, S.M. Hidayat, W., Bazenet, W.A., Banuwa, I.S., dan Riniarti, M. 2021. Pengaruh Variasi Kadar Perekat Tapioka terhadap Karakteristik Briket Arang Limbah Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*). *Perennial* 17(1): 5-11.
- Riyadi, A.H., Muchtadi, T.R., Andarwulan, N., dan Haryati, T. 2016. Pilot plant study of red palm oil deodorization using moderate temperature. *In Agriculture and Agricultural Science Procedia* 9: 209–216.
- Röder, M. Whittaker, C., dan Thornley, P. 2014. How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues. *Biomass Bioenergy* 79: 50-63.
- Romadhon, F.D., dan Subekti, R. 2023. Analisis pengaturan energi terbarukan dalam kendaraan berbasis elektrik untuk mendukung perlindungan lingkungan (analisis komparatif antara Indonesia, Brazil, dan Pakistan). *Jurnal Pacta Sunt Servanda* 4(1): 177-190.
- Ru, B., Wang, S., Dai, G., dan Zhang, L. 2015. Effect of torrefaction on biomass physicochemical characteristics and the resulting pyrolysis behavior. *Energy and Fuels* 29(9): 5865–5874.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., dan 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.
- Ruchjana, B. N., Falah, A. N., Rusyaman, E., Hamid, N. 2019. prediksi nilai fixed carbon sebagai variabel dalam kualitas batubara dengan metoda ordinary point kriging menggunakan aplikasi R. *Buletin Sumber Daya Geologi* 14(2): 127-141.
- Rudolfsson, M., Borén, E., Pommer, L., Nordin, A., dan Lestander, T. A. 2017. Combined effects of torefaksi and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass. *Applied Energy* 191(1): 414–424.
- Salca, E.A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., dan Suzuki, S. 2016. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. *Journal of Wood Science* 62(4): 297–304.
- Saputra, B., Tambunan, K.G.A., Suri, I.F., Febryano, I.G., Iswandaru, D., dan Hidayat, W. 2022. Effects of torrefaction temperature on the characteristics of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian* 11(2): 339-353.
- Sette Jr, C. R., Castro e Freitas, P. de, Freitas, V. P., Yamaji, F. M., dan Almeida, R.A. 2016. Production and characterization of bamboo pellets. *Bioscience Journal*: 922–930.

- Shao, J., Cheng, W., Zhu, Y., Yang, W., Fan, J., Liu, H., Yang, H., dan Chen, H. 2019. Effects of combined torefaksi and pelletization on particulate matter emission from biomass pellet combustion. *Energy and Fuels* 33(9): 8777–8785.
- Simonic, M., Goricanec, D., dan Urbancl, D. 2020. Impact of torrefaction on biomass properties depending on temperature and operation time. *Science of The Total Environment* 740: 140086.
- Sinurat, E. 2011. Studi pemanfaatan briket kulit jambu mete dan tongkol jagung sebagai bahan bakar alternatif. Makasar: Universitas Hasanudin.
- Sipahutar, W.S., Maulana, S., Augustina, S., Murda, R.A., dan Bindar, Y. 2021. Effects of heat treatment on the wettability and color properties of betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) strand. *Earth and Environmental Science* 830: 1–8.
- Siyal, A. A., Liu, Y., Mao, X., Ali, B., Husaain, S., Dai, J., Zhang, T., Fu, J., dan Liu, G. 2021. Characterization and quality analysis of wood pellets: Effect of pelletization and torrefaction process variables on quality. *Biomass Conversion and Biorefinery* 11: 2201–2217.
- Smith, A., Liline, S., dan Sahetapy, S. 2023. Analisis kadar abu pada salak merah (*Salacca edulis*) di Desa Riring dan Desa Buria Kecamatan Taniwel Kabupaten Seram Bagian Barat Provinsi Maluku. *Biopendix* 10(1): 51-57.
- Soolany, C. 2020. Rancang bangun pencetak briket tipe screw untuk proses produksi briket pelet dari arang cangkang kakao. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 6(2): 62-68.
- Soponpongpiat, N., Sittikul, D., dan Sae-Ueng, U. 2015. Higher heating value prediction of torrefaction char produced from nonwoody biomass. *Front Energy* 9(4): 461-471.
- Suganal, S., dan Hudaya, G. K. 2019. Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (Skala Laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara* 15(1): 31–48.
- Sukarta, I. N., dan Ayuni, P. S. 2016. Analisis proksimat dan nilai kalor pada pellet biosolid yang dikombinasikan dengan biomassa limbah bambu. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)* 5(1): 728–735.
- Sukiran, M.A., Abnisa, F., Daud, W.M.A.W., Bakar, N.A., dan Loh, S.K. 2017. A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Convers Manag* 149: 101–20.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., dan Hidayat, W. 2020. Effects of torrefaction with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) reactor and electric furnace on the properties of Jabon (*Anthocephalus cadamba*) pellets. *Jurnal Sylva Lestari* 8(1): 65-76.

- Sultana, A., dan Kumar, A. 2012. Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. *Biomass Bioenergy* 39: 344–355.
- Sunardi, S., Djuanda, D., dan Mandra, M.A.S. 2019. Characteristics of charcoal briquettes from agricultural waste with compaction pressure and particle size variation as alternative fuel. *International Energy Journal* 19(3): 139-148.
- Suwadji, S., Pebriana, H. 2018. Sifat wood *pellet* dari limbah kayu jati. *Jurnal Wana Tropika* 8(2): 47-58.
- Tabil, L., dan Jr., Sokhansanj, S. 1996. Process conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. *Appl. Eng. Agric* 12: 345–350.
- Tambunan, K.G.A., Saputra, B., Suri, I.F., Febryano, I.G., Bintoro, A., dan 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.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., dan Böhm, T. 2006. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass Bioenergy* 30: 964–972.
- Thacker, H. 2013. *Strong Regulatory Push Can Jumpstart the Dormant Biomass Sector in Indonesia*. Frost and Sullivan.
- Trømborg, E., Rantab, T., Schweinlec, J., Solberg, B., Skjevraak, G., dan Tiffany, D.G. 2013. Economic sustainability for wood pellets production – a comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the USA. *Biomass Bioenergy* 57: 68-77.
- Tsandra, N. A., Sunaryo, R. P., Syafr, dan Octaviani, O. 2023. Pengaruh konsumsi energi dan aktivitas ekonomi terhadap emisi CO₂ di Negara G20. *e-Journal Ekonomi Bisnis dan Akuntansi* 10(2): 69-79.
- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T., dan Boardman, R.D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology* 7(5): 384-401.
- Uddin, M.N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., dan Ashrafur, S. M. 2018. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies* 11: 3115.
- Uemura, Y., Omar, W., Othman, N.A., Yusup, S., dan Tsutsui, T. 2013. Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel* 144: 171–179.

- Ulfah, D., Lusyani, Gusti A.R. Thamrin, dan Rahmiyati. 2021. Kualitas biopellet limbah sekam padi (*Oryza sativa*) sebagai salah satu solusi dalam menghadapi krisis energi. *Jurnal Hutan Tropis* 9(2): 412-424.
- Uslu, A., Faaij, A.P.C., dan Bergman, P.C.A. 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torefaksi, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy* 33: 1206-1223.
- Utomo, P., dan Yunita, I. 2014. *Sintesis Zeolit dari Abu Sekam Padi Pada Temperatur Kamar*. Yogyakarta (ID): Universitas Negeri Yogyakarta.
- Valverde, J.C., dan 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 and Application* 39(5): 519-529.
- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Pratiwi, W.Z., dan Dianratri, I. 2021. "Biopellet" as one of future promising biomass-based renewable energy: a review. *E3S Web of Conferences* 317: 4-29.
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M., dan Nielsen, H. K. 2020. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy and Fuels* 34(12): 15343–15354.
- Whittaker, C., dan Shield, I. 2017. Factors affecting wood, energy gas and straw pellet durability - A review. *Renew. Sustain. Energy Rev* 71: 1–11.
- Wibowo, S., Laia, D.P.O., Khotib, M., dan Pari, G. 2017. Karakterisasi karbon pellet campuran rumput gajah (*Pennisetum purpureum* Scumach) dan tempurung nyamplung (*Calophyllum inophyllum* Linn.). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 35(1): 73-82.
- Widjaya, E.R., Chen, G., Bowtell, L., dan Hills, C. 2018. Gasification of non-woody biomass: A literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev* 89: 184–193.
- Wilk, M., Magdziarz, A., Gajek, M., Zajemska, M., Jayaraman, K., dan Gokalp, I. 2017. Combustion and kinetic parameters estimation of torrefied pine, acacia and *Miscanthus giganteus* using experimental and modelling techniques. *Bioresour. Technol.* 243: 304–314.
- Yang, Y., Sun, M., Zhang, M., Zhang, K., Wang, D., dan Lei, C. 2019. A fundamental research on synchronized torefaksi and pelleting of biomass. *Renewable Energy* 142: 668-676.
- Yoshida, T., Kuroda, K., Kamikawa, D., Kubojima, Y., Nomura, T., Watada, H., Sano, T., dan Ohara, S. 2021. Water resistance of torrefied wood pellets prepared by different methods. *Energies* 14(6): 1–10.

- Yu, Y., Zhu, Z., Wang, L., Wang, G., dan Bai, X. 2021. Effect of torefaksi treatment on physical and fuel properties of caragana (*Caragana korshinskii*) pellets. *Bioenergy Research* 14(4): 1277–1288.
- Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudin, U., dan Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* 9(2): 104–111.
- Zafari, A., dan Kianmehr, M.H. 2014. Effect of temperature, pressure and moisture content on durability of cattle manure pellet in open-end die method. *J. Agric. Sci* 4: 203–208.
- Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., dan Cao, X. 2020. Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12: 2061–2070.