

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP KARAKTERISTIK PELET
BAMBU ANDONG (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)**

Skripsi

Oleh

**KARINA GRACIA AGATHA TAMBUNAN
1814151031**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

**PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP KARAKTERISTIK PELET
BAMBU ANDONG (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)**

Oleh

KARINA GRACIA AGATHA TAMBUNAN

Skripsi

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

pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP KARAKTERISTIK PELET BAMBU ANDONG (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)

Oleh

KARINA GRACIA AGATHA TAMBUNAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perubahan karakteristik pelet bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*) hasil torefaksi. Pelet ditorefaksi selama 50 menit dengan *electric furnace* pada suhu 200°C, 240°C, dan 280°C. Karakteristik yang diamati meliputi sifat fisis (warna, kadar air, kerapatan, penyerapan uap air, dan ketahanan terhadap perendaman air), sifat mekanis (kekuatan tekan), FTIR, analisis proksimat, dan nilai kalor. Nilai (ΔE^*) lebih dari 12 menunjukkan warna pelet bambu andong hasil torefaksi berubah total. Kadar air dan kerapatan berkurang dengan meningkatnya suhu torefaksi. Pelet torefaksi lebih tahan daripada pelet kontrol terhadap perendaman air dan penyerapan uap air akibat sifat hidrofobik meningkat sejalan dengan peningkatan suhu torefaksi. Kekuatan tekan menurun seiring dengan meningkatnya suhu. Torefaksi mempengaruhi gugus fungsi pelet bambu andong. Kadar abu dan zat mudah terbang menurun dengan meningkatnya suhu torefaksi namun karbon terikat dan nilai kalor meningkat.

Kata kunci: bambu andong, *electric furnace*, pelet, torefaksi

ABSTRACT

EFFECT OF TORREFACTION ON CHARACTERISTIC OF ANDONG BAMBOO PELLETT (Gigantochloa pseudoarundinacea)

By

KARINA GRACIA AGATHA TAMBUNAN

This study aimed to evaluate the changes in andong bamboo pellet's characteristics. The pellets were torrefied for 50 min using an electric furnace at 200°C, 240°C, and 280°C. The characteristics analyzed were physical properties (color, moisture content, density, moisture adsorption, and water resistance), mechanical properties (compressive strength), FTIR, proximate analysis, and calorific value. The torrefaction pellet was more resistant to water adsorption, and water immersion due to the hydrophobic properties increased with increasing torrefaction temperature. The compressive strength decreased as increasing the temperature. Torrefaction affected the functional groups of bamboo andong pellets. Ash content and volatile matter decreased as increasing torrefaction temperature however fixed carbon and calorific value increased.

Keywords: andong bamboo, electric furnace, pellet, torrefaction

Judul : **PENGARUH TOREFAKSI TERHADAP
KARAKTERISTIK PELET BAMBUI ANDONG**
(*Gigantochloa pseudoarundinacea*)

Nama Mahasiswa : **Karina Gracia Agatha Tambunan**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1814151031**

Program Studi : **Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**



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

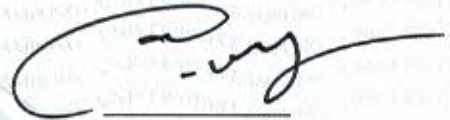
2. Ketua Jurusan

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



Anggota : Drs. Afif Bintoro, M.P.

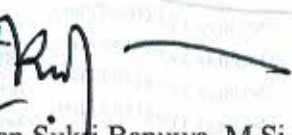


Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Iwan Sukti Banuwa, M.Si.

NIP. 196110201986031002



Tanggal lulus ujian skripsi: 13 Juni 2022

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Karina Gracia Agatha Tambunan
NPM : 181415104
Jurusan : Kehutanan
Alamat Rumah : Jl. Jaya 1 no. 221 Kel. Jatimulya, Kec. Tambun Selatan, Kab. Bekasi

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

**“Pengaruh Torefaksi Terhadap Karakteristik Pelet Bambu Andong
(*Gigantochloa pseudoarundinacea*)”**

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

Bandar Lampung, 31 Juli 2022
Yang membuat pernyataan,



Karina Gracia Agatha Tambunan
NPM 1814151031

RIWAYAT PENULIS



Karina Gracia Agatha Tambunan lahir di Pematang Siantar, 17 Februari 2000. Penulis merupakan putri tunggal dari Bapak Efendi Tambunan dan Ibu Chrisetty Ambarita. Pendidikan yang telah ditempuh penulis meliputi TK Kristen Kalam Kudus 2003-2006, SD Kristen Kalam Kudus 2006-2010, SD Bina Kreasi Mandiri 2010-2012, SMP Yayasan Abdi Karya Mandiri 2012-2015, dan SMAN 1 Tambun Selatan. Program Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) tahun 2018 menghantarkan penulis menjadi mahasiswi di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyulva) dan menjadi anggota divisi Komunikasi, Informasi dan Pengabdian Masyarakat tahun 2021. Selama perkuliahan berlangsung, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum mata kuliah Hasil Hutan Bukan Kayu tahun 2021 dan Pembangunan Kehutanan tahun 2022. Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) tahun 2021 di Kecamatan Rawa Lumbu, Bekasi serta Praktik Umum selama 20 hari di Taman Nasional Way Kambas tahun 2021. Penulis telah mempublikasikan tulisan ilmiah berjudul “Perubahan Sifat Fisis dan Mekanis Pelet Bambu Andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)” pada Jurnal Agrotek.

Teruntuk Mama Terkasih

SANWACANA

Puji syukur atas berkat dan anugerah Tuhan Yesus Kristus sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Torefaksi Terhadap Karakteristik Pelet Bambu Andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)”.

Penulis dapat menyelesaikan penelitian serta skripsi atas bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan pembahas atas dukungan maupun kritik dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing tunggal yang telah membimbing dengan penuh kesabaran, memberikan waktu, motivasi, gagasan serta nasihat kepada penulis hingga skripsi terselesaikan.
4. Bapak Drs. Afif Bintoro, M.P. selaku pembahas atas dukungan maupun kritik dan saran yang telah diberikan.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng P. Harianto, M.S. selaku pembimbing akademik atas bimbingan dan motivasi yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan sarja di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah membimbing dan mendidik penulis selama menempuh masa studi.
7. Ibunda tercinta, Ibu Chrisetty Ambarita dan Tante Tresia atas doa, kasih sayang, dukungan, dan pengertian yang tiada henti diberikan kepada penulis.

8. Keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan.
9. Bagus, Alim, Rasyidah, Rahel, dan Wisesa selaku rekan dalam Tim Teknologi Hasil Hutan atas segala bantuan, dukungan, dan semangat yang diberikan.
10. Mba Intan Fajar Suri, S.Hut., M.Sc. atas waktu, bimbingan, dan koreksian yang diberikan.
11. Melissa, Velda, Intan, Arum, Eklesia, Vita, dan Nata yang mendukung dan menemani penulis sejak awal perkuliahan hingga akhir.
12. Keluarga besar Corsyl dan Himasyiva Universitas Lampung.
13. Semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian dan penulisan skripsi.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna namun penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan bahan bakar berbasis biomassa.

Bandar Lampung, 08 Juli 2022

Karina Gracia Agatha Tambunan

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	4
1.4 Kerangka Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Biomassa dan Teknik Konversi	5
2.2 Potensi dan Karakteristik Bambu Andong.....	6
2.3 Pelet Biomassa	8
2.4 Torefaksi dan Reaktor <i>Electric Furnace</i> (EF)	11
III. METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Tempat	14
3.2 Alat dan Bahan.....	14
3.3 Penyaringan dan Penyortiran	14
3.4 Proses Torefaksi dengan Reaktor <i>Electric Furnace</i> (EF)	15
3.5 Analisis Parameter	15
3.6 Analisis Deskriptif	18
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Sifat Fisis Pelet Bambu Andong Hasil Torefaksi Reaktor <i>Electric Furnace</i>	19
4.2 Sifat Mekanis Pelet Bambu Andong Hasil Torefaksi Reaktor <i>Electric Furnace</i>	27
4.3 FTIR Pelet Bambu Andong Hasil Torefaksi Reaktor <i>Electric Furnace</i>	28
4.4 Analisis Proksimat Pelet Bambu Andong Hasil Torefaksi	29

	Halaman
4.5 Nilai Kalor	32
V. SIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Simpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	45

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Standar kualitas pelet kayu berdasarkan <i>The Pellet Fuel Institute</i>	10
2. Standar kualitas pelet kayu DIN (Jerman) dan Ö NORM (Austria)	10
3. Standar mutu pelet kayu/pelet energi Eropa (EN Plus).....	11
4. Nilai klasifikasi perubahan warna (Valverde dan Moya, 2014).....	16
5. Pengujian perendaman air sebelum dan sesudah ditorefaksi.....	26
6. Hasil pengukuran zat mudah menguap.....	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran	4
2. Alur pembuatan pelet.....	8
3. Alur proses pada industri pellet kayu/pellet energi komersil	9
4. Reaktor <i>electric furnace</i>	15
5. Tampilan visual pelet bambu andong sebelum dan setelah torefaksi pada berbagai suhu	19
6. Perubahan kecerahan sebelum dan sesudah ditorefaksi	20
7. Perubahan kromatisasi merah/hijau sebelum dan sesudah ditorefaksi	21
8. Perubahan kromatisasi kuning/biru sebelum dan sesudah ditorefaksi	21
9. Perubahan warna total pelet bambu andong sesudah ditorefaksi	22
10. Perubahan kerapatan pada kering udara dan kering oven	23
11. Perubahan kadar air sebelum dan sesudah ditorefaksi	23
12. Perubahan adsorpsi uap air pelet bambu andong selama 30 hari pengujian	24
13. Perubahan kuat tekan sebelum dan sesudah ditorefaksi	27
14. Hasil pengujian FTIR sebelum dan sesudah ditorefaksi	28
15. Perubahan kadar abu sebelum dan sesudah ditorefaksi.....	29
16. Perubahan kadar karbon terikat sebelum dan sesudah ditorefaksi	32
17. Perubahan nilai kalor sebelum dan sesudah ditorefaksi	33

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Hasil pengujian nilai kalor	46
2. Hasil pengujian kadar abu.....	47
3. Hasil pengujian zat mudah terbang (<i>volatile matter</i>).....	48
4. Hasil FTIR pelet bambu andong kontrol.....	49
5. Hasil FTIR pelet bambu andong 200°C	50
6. Hasil FTIR pelet bambu andong 240°C	51
7. Hasil FTIR pelet bambu andong 280°C	52
8. Dokumentasi	53

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Biomassa merujuk pada bahan organik hasil fotosintesis baik berupa produk hasil hutan dan pertanian maupun dalam bentuk limbah (Suganal dan Hudaya, 2019). Keberadaan biomassa telah memainkan peran penting sebagai sumber energi terbarukan ketika terbatasnya ketersediaan energi fosil (Lauri *et al.*, 2014). Pemanfaatan biomassa sebagai energi terbarukan tidak menyebabkan peningkatan karbon dioksida di atmosfer karena berasal dari biogenik (Tkemaladze dan Makhshvili, 2016). Bumi menyimpan sejumlah besar biomassa yang tersedia di berbagai areal mulai dari hutan hingga lautan (Tursi, 2019). Menurut *World Bioenergy Association* (2018), ketersediaan biomassa dan cadangan air dunia sekitar 1,8 triliun ton dan 4 miliar ton. *World Bioenergy Association* (2018) juga melaporkan bahwa total biomassa di dunia dari segi energi memiliki potensi kapasitas produksi sebesar 33.000 EJ atau sesuai dengan lebih dari 80 kali konsumsi energi tahunan di dunia.

Indonesia memiliki biomassa yang cukup besar sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Semua jenis sampah organik termasuk kotoran hewan berpotensi untuk dikembangkan. Tanaman pangan dan perkebunan menghasilkan banyak limbah yang dapat digunakan untuk hal lain seperti bahan bakar hayati (Hendra, 2011). Kehutanan juga turut menghasilkan limbah diantaranya limbah pemanenan kayu dan limbah hasil gergajian (Malik, 2013.; Soenarno *et al.*, 2016). Terdapat tiga keuntungan dari pemanfaatan limbah sebagai bahan bakar hayati. Pertama, kandungan energi dari limbah cukup besar sehingga pemanfaatan tersebut menciptakan peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan. Kedua, pemanfaatan limbah memberikan keuntungan ekonomi.

Ketiga, meminimalisir kebutuhan tempat pembuangan akhir (TPA) karena penyediaan TPA khususnya di perkotaan lebih sulit dan mahal (Hendra, 2011).

Salah satu jenis biomassa yang banyak ditemukan di Indonesia yaitu bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*). Bambu andong merupakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui dengan sangat cepat. Moroz *et al.* (2014) melaporkan bahwa bambu memerlukan waktu tumbuh 4 hingga 5 tahun agar bambu siap digunakan. Karakteristik kimia bambu andong tersusun dari komponen yang hampir sama dengan kayu yaitu selulosa, hemiselulosa, lignin dan zat ekstraktif. Bambu andong dalam penggunaannya sebagai bioenergi memiliki beberapa kelemahan. Pertama, sensitivitas bambu sangat tinggi terhadap air sama seperti kayu. Kemampuan penyerapan air tersebut menyebabkan tingginya kadar air yang terkandung (Bui *et al.*, 2017). Kedua, bambu juga rentan terserang perusak biologis. Suriani (2017) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa rayap, jamur, kumbang bubuk, dan mikroorganisme laut dapat menyebabkan pelapukan dan perubahan warna bambu. Ketiga, pendistribusian bambu setelah dipanen dalam tidak mudah sehingga membutuhkan transportasi untuk mengangkut bambu keluar dari lokasi pemanenan.

Efisiensi penggunaan bambu sebagai sumber energi dapat diperoleh dengan mengonversi bentuk mentah bambu menjadi pelet. Pemanfaatan pelet bambu andong memiliki kelemahan seperti bahan mentahnya yaitu memiliki daya serap air yang tinggi. Sifat higroskopis akan mengganggu penggunaannya sebagai energi karena panas yang tersimpan dalam pelet akan digunakan untuk mengeluarkan air terlebih dahulu kemudian menghasilkan panas untuk pembakaran (Iskandar dan Rofiatin, 2017). Pelet dengan kadar air yang tinggi juga rentan mengalami pembusukan akibat aktivitas organisme. Aktivitas organisme dapat meluruhkan bahan organik di dalam pelet (Wibowo dan Lestari, 2018). Kadar air yang tinggi serta aktivitas mikroorganisme juga dapat menurunkan nilai kalor sehingga efisiensi pemanasan pelet turut berkurang (Park *et al.*, 2020).

Salah satu perlakuan yang dapat meningkatkan efektivitas energi pelet bambu andong adalah melalui torefaksi. Torefaksi merupakan proses termokimia

yang dilakukan pada suhu berkisar 200°C - 300°C pada kondisi rendah oksigen dengan durasi 30 menit hingga 1 jam (Bach *et al.*, 2017; Bourgonje *et al.*, 2017; Pahla *et al.*, 2018; Rajnai *et al.*, 2017). Torefaksi dapat meningkatkan nilai kalor biomassa serta mengatasi kelemahan yang dimiliki seperti kadar air yang tinggi serta nilai kalor dan efisiensi pembakaran yang rendah (Bach *et al.*, 2017; Thaim dan Rasid, 2016). Proses torefaksi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan *electric furnace* (EF). *Electric furnace* atau tungku listrik merupakan alat pemanas bahan yang dapat mengubah bentuk dan mengubah sifat bahan akibat perlakuan panas (Rizal *et al.*, 2016). Penelitian torefaksi menggunakan biomassa bambu masih terbatas (Pah *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2019; Sucipta *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2015). Sucipta *et al.* (2017) mengkaji torefaksi bambu ampel (*Bambusa vulgaris*) dan Pah *et al.* (2021) melakukan torefaksi menggunakan bambu betung (*Dendrocalamus asper*). Namun, penelitian yang mengkaji tentang torefaksi bambu andong menggunakan *electric furnace* (EF) pada berbagai suhu belum pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mengetahui pengaruh torefaksi pada suhu 200°C, 240°C, dan 280°C terhadap peningkatan kualitas pelet bambu andong.

Berdasarkan latar belakang di atas, kajian masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa saja pengaruh torefaksi dengan reaktor EF terhadap sifat fisis dan mekanis pelet bambu andong.
2. Apa saja pengaruh torefaksi dengan reaktor EF terhadap terhadap sifat kimia dan nilai kalor pelet bambu andong.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor EF terhadap sifat fisis dan mekanis pelet bambu andong.
2. Mengetahui pengaruh torefaksi dengan reaktor EF terhadap terhadap sifat kimia dan nilai kalor pelet bambu andong.

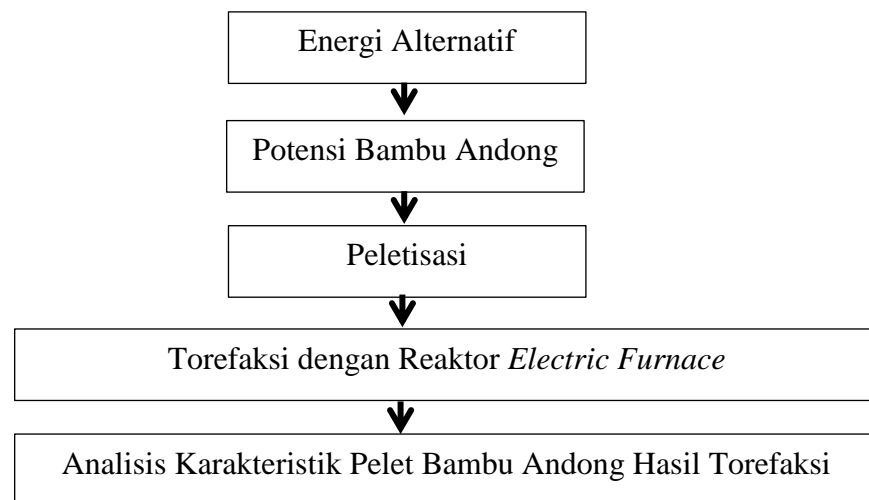
1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi tolak ukur pengembangan kualitas pelet bambu andong.
2. Menjadi alternatif energi skala besar bagi industri.

1.4 Kerangka Penelitian

Konsumsi energi fosil yang tinggi tidak sejalan dengan ketersediaan bahan yang terbatas di alam. Salah satu jawaban untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan adalah dengan mencari dan menciptakan energi alternatif yang berkelanjutan. Biomassa merupakan salah satu sumber energi alternatif yang menjanjikan karena bersifat terbarukan dan dapat dipanen dalam jangka waktu relatif singkat (Nawawi *et al.*, 2018). Biopelet merupakan bahan bakar yang diproduksi melalui pemadatan biomassa berbentuk silinder dengan diameter 12 mm dan panjang 6–25 mm (Rusdianto *et al.*, 2014). Penelitian ini menggunakan reaktor *electric furnace* (EF).



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa dan Teknik Konversi

Biomassa dikenal dalam industri energi sebagai bahan baku biologis untuk pembuatan bahan bakar (Nur dan Jusuf, 2014). Istilah biomassa merujuk kepada sumber daya yang mengandung matriks organik yang dapat berasal dari tumbuhan maupun hewan dan disediakan secara langsung oleh alam atau sengaja dibudidayakan (Bonechi *et al.*, 2017). Menurut Hermawati *et al.* (2014), biomassa merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang potensinya sangat melimpah tetapi penggunaannya belum optimal.

Limbah sumber biomassa dapat diperoleh dari limbah kehutanan, limbah perkebunan, limbah pertanian, serta limbah organik dari pemukiman penduduk (Nur dan Jusuf, 2014). Limbah kehutanan dapat berasal dari pemanenan kayu maupun industri pengolahan kayu (Malik, 2013.; Soenarno *et al.*, 2016). Limbah pemanenan kayu dapat dikategorikan menjadi tunggul, batang patah, cabang, ranting, serta pohon yang jatuh akibat pemanenan (Haryanto *et al.*, 2021). Limbah pemanenan pada perhitungan tahun 2013 masih cukup signifikan. Data sisa penebangan yang diungkapkan sebesar 33,80% di Sumatera Barat dan 30,10% di Kalimantan Tengah. Terungkap pula volume limbah kayu sebesar 2,70 - 7,90 m³/pohon atau 21,20 - 69,60 m³/ha di Kalimantan Tengah dan 17,40 - 48,70 m³/ha di Sumatera Barat (Matangaran *et al.*, 2013). Limbah dari industri pengolahan kayu dapat berupa potongan kayu, balok, kayu rusak, dan serbuk gergaji (Haryanto *et al.*, 2021).

Limbah yang dihasilkan dari perkebunan kelapa sawit (PKS) adalah tandan kosong sebesar 22% - 24%, cangkang sawit 5% - 8% serta limbah cair atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) sebesar 50% untuk setiap ton tandan buah segar yang diolah PKS (Nur dan Jusuf, 2014). Setiap tahun Indonesia menghasilkan

ratusan juta ton limbah pertanian. Pengelolaan limbah yang kurang baik menjadi potensi terjadinya pencemaran lingkungan (Khaidir, 2016). Industri perkayuan juga turut mendukung produksi limbah seperti potongan kayu tak beraturan, kupasan kayu, serta serbuk gergajian (Malik, 2013).

Praktik sederhana penggunaan biomassa sebagai bahan bakar dengan cara langsung dibakar. Beberapa cara konversi yang lebih modern dapat dilakukan yaitu pembuatan briket, gasifikasi, pirolisis, *liquification*, densifikasi, dan karbonisasi (Parinduri dan Parinduri, 2020). Pembuatan briket telah banyak dikembangkan dengan menggabungkan berbagai jenis bahan organik (Martynis *et al.*, 2012). Pirolisis adalah proses dekomposisi suatu bahan pada suhu tinggi tanpa ada atau terbatas jumlah oksigen (Ridhuan *et al.*, 2019). Menurut Wijayanti *et al.* (2013), pirolisis terjadi pada suhu di atas 300°C dalam waktu 4-7 jam dan menghasilkan arang, gas ataupun minyak.

Gasifikasi adalah konversi biomassa menjadi gas dalam reaktor *gasifier* dengan kondisi oksigen terbatas pada suhu berkisar antara 128°C–619°C (Abineno dan Koylal, 2018). *Liquification* merupakan konversi biomassa dengan bahan pelarut yang dilakukan pada suhu 150°C–370°C dan tekanan berkisar 10 bar-240 bar (Kumar *et al.*, 2014; Murti, 2018). Karbonisasi disebut juga pengarangan berguna untuk mengubah senyawa organik menjadi atom karbon (Salim, 2016). Proses densifikasi adalah proses pemadatan biomassa dengan cara pengempaan (penekanan) sehingga kerapat massa atau juga kerapatan potensi energinya meningkat. Proses densifikasi diterapkan terhadap biomassa karena kandungan energi spesifik alaminya rendah (Azhar dan Rustamaji, 2009).

2.2 Potensi dan Karakteristik Bambu Andong

Bambu merupakan komoditas dengan produksi terbesar di Indonesia dibandingkan dengan hasil hutan non kayu lainnya (Hariz *et al.*, 2021). Bambu juga termasuk jenis cepat tumbuh dengan kekuatan mekanik tinggi sejajar dengan arah serat dan lebih ringan dari kayu (Febrianto *et al.*, 2017; Maulana *et al.*, 2021a). Seluas 2 juta ha lahan di Indonesia ditumbuhi bambu yang merupakan 5% dari populasi bambu dunia yang terdiri atas 33 genus dan 160 spesies (Park *et al.*, 2021). Lebih dari separuh jenis bambu yang terdapat di Indonesia merupakan

jenis endemik (Widjaja dan Karsono, 2005). Sejak dahulu, bambu dianggap sebagai tanaman serbaguna. Bambu digunakan sebagai bahan pangan, peralatan rumah tangga, alat musik hingga bahan bangunan (Akmal *et al.*, 2011; Widjaja dan Karsono, 2005). Berbagai jenis bambu dapat ditemukan dengan mudah di Indonesia seperti bambu andong.

Bambu andong dengan nama ilmiah *Gigantochloa pseudoarundinacea* memiliki urutan taksonomi sebagai berikut.

Kerajaan : Plantae
 Divisi : Magnoliophyta
 Kelas : Liliopsida
 Bangsa : Poales
 Suku : Poaceae
 Marga : Gigantochloa
 Jenis : *Gigantochloa pseudoarundinacea*

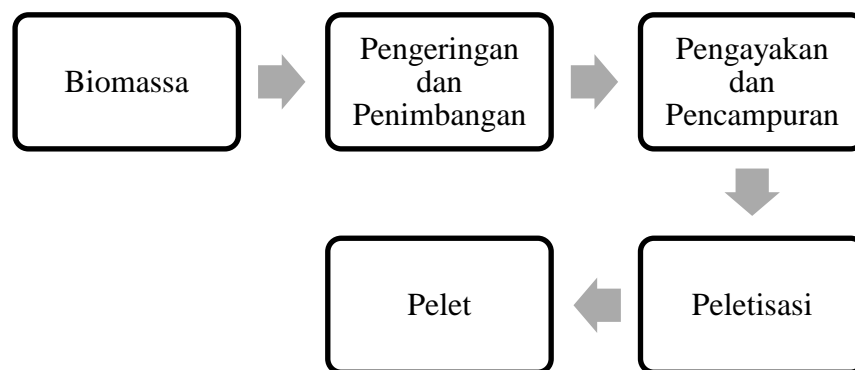
Bambu andong tumbuh di dataran rendah mencapai ketinggian 1500 mdpl dan tumbuh baik di daerah tropis yang lembab (Widjaja *et al.*, 2020). Widjaja *et al.* (2020) juga menyebutkan persebaran bambu andong berada di sepanjang Provinsi Lampung dan Pulau Jawa. Bambu andong memiliki sifat higroskopis, menyerap air dari sekitarnya untuk mencapai kadar air keseimbangan. Densitas yang dimiliki bambu andong tergolong seragam dan cukup tinggi dari pangkal sampai ujung sehingga sangat berpotensi untuk dijadikan bahan bangunan (Bahtiar *et al.*, 2019). Riastuti *et al.* (2019) mendeskripsikan panjang bambu andong secara keseluruhan dapat lebih dari 81 cm, ketebalan berkisar 3 mm - 5 mm, dan diameter keliling mencapai 4 cm - 8 cm. Sutardi *et al.* (2015) juga menjelaskan ciri fisik dari bambu andong. Penelitiannya menyebutkan bahwa batang bambu andong berwarna hijau dengan garis vertikal putih saat basah dan berubah menjadi kekuningan saat kering. Bambu andong sangat berat baik dalam kondisi basah maupun kering.

Komponen kimia dinding sel bambu andong terdiri dari lignin dan holoselulosa. Bambu andong memiliki kandungan lignin sebesar 22% dan kandungan holoselulosa sebesar 78% (Bahtiar *et al.*, 2016). Holoselulosa terdiri dari selulosa dan hemiselulosa. Rasio hemiselulosa terhadap holoselulosa yang

terdapat dalam ruas (internodus) bambu andong sebesar 47% dan rasio selulosa terhadap holoselulosa yang terdapat dalam ruas bambu andong sebesar 53%. Holoselulosa juga terdapat dalam nodus atau buku-buku batang bambu andong. Rasio hemiselulosa terhadap holoselulosa yang terdapat dalam nodus bambu andong sebesar 52% dan rasio selulosa terhadap holoselulosa sebesar 48% (Bahtiar *et al.*, 2016). Haris (2018) menyebutkan bahwa kadar air bambu andong sebesar 27,07%. Kerapatan bambu andong sebesar 0,85 g/cm³ (Barly *et al.*, 2012).

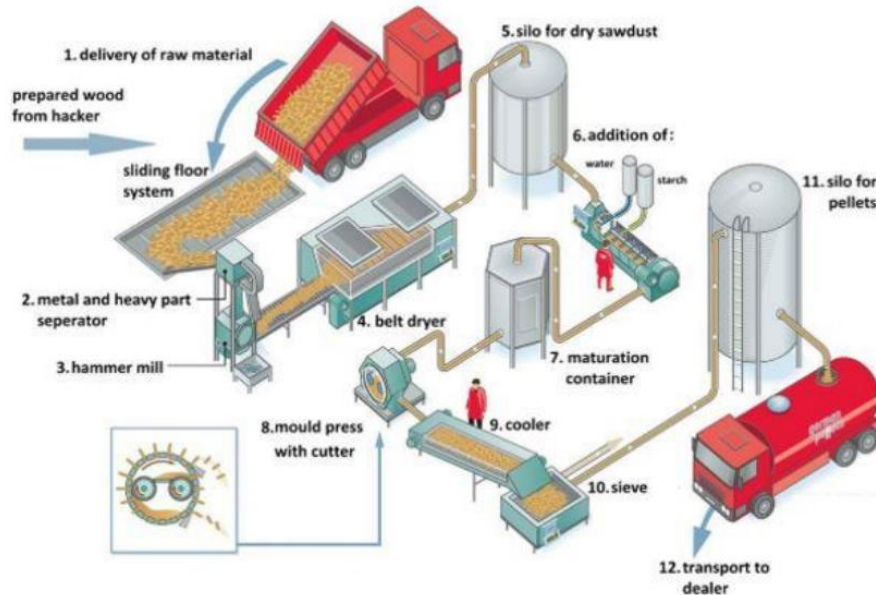
2.3 Pelet Biomassa

Pelet merupakan sumber energi alternatif yang diperoleh dari proses pemadatan biomassa (Mustamu *et al.*, 2018). Pembuatan pelet terdiri atas tahap sortasi, pengeringan dan penimbangan, pengayakan, *mixing*, dan *pelletizing* (Alamsyah *et al.*, 2016). Sortasi dilakukan untuk memperoleh biomassa yang bersih agar menghasilkan keseragaman mutu pelet. Selanjutnya dilakukan pengeringan untuk memperoleh kadar air kesetimbangan sesuai standar yang berlaku. Penimbangan dilakukan juga untuk memperoleh mutu yang seragam. Mutu struktur pelet yang baik akan menghasilkan emisi yang rendah atau *low emission* (Lee *et al.*, 2000; Hroncová *et al.*, 2014). Bahan baku yang telah ditimbang kemudian diayak dan dimasukkan ke dalam mesin pengaduk. Tahap pengadukan dilakukan untuk mencapai homogenitas kandungan energi. Tahap *pelletizing* bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar berbentuk tabung dengan ukuran tertentu. Pembuatan pelet dilakukan dengan mesin *pelletizer* (Alamsyah *et al.*, 2016).



Gambar 2. Alur pembuatan pelet.

Proses peletisasi telah dilakukan secara modern pada produksi komersil berskala besar dengan menggunakan teknologi yang telah terkomputerisasi. Proses diawali dengan menyediakan bahan baku ke industri. Biomassa akan dipisah berdasarkan kondisinya. Tujuan pemisahan guna mendapatkan keseragaman sejak tahap awal produksi (Amrita, 2018).



Sumber: German Pellets

Gambar 3. Alur proses pada industri pellet kayu/pellet energi komersil.

Proses pertama yaitu menghaluskan biomassa hingga dapat dijadikan adonan. Proses peletisasi dipengaruhi oleh kadar air sehingga proses pengeringan diperlukan untuk mengurangi kadar air biomassa. Biomassa yang telah kering dicetak dengan *peletizer* dan dimasukkan ke dalam *cooling tower* untuk didinginkan serta membantu proses pengerasan pelet (Amirta, 2018). Berikut ini disajikan beberapa standar mutu pelet sebagai sumber energi. Standar kualitas mutu yang disajikan telah ditetapkan oleh *The Pellet Fuel Institute* (PFI) yang secara umum digunakan pada penilaian kualitas produk pelet kayu di Amerika dan EN-Plus digunakan pada penilaian mutu produk pelet kayu atau pelet energi di beberapa negara Eropa. Selain itu disajikan juga standar kualitas mutu yang ditetapkan dan berlaku di Jerman (DIN) dan Austria (Ö NORM).

Tabel 1. Standar kualitas pelet kayu berdasarkan *The Pellet Fuel Institute*
(Amerika Serikat)

Sifat Bahan Bakar	Standar Bahan Bakar Untuk Rumah Tangga/Komersil		
	PFI Premium	PFI Standard	PFI Utility
Kerapatan (g/cm ³)	0,64-0,74	0,64-0,74	0,64-0,74
Diameter (mm)	5,84 – 7,24	5,84 – 7,24	5,84 – 7,24
Indeks Ketahanan (%)	≥ 96,5	≥ 96,5	≥ 96,5
Bahan Halus (%)	≤ 0,5	≤ 1,0	≤ 1,0
Kadar Abu (%)	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,0
Panjang (mm)	≤ 25,4	≤ 25,4	≤ 25,4
Kadar Air (%)	≤ 8,0	≤ 10,0	≤ 10,0
Klorin (ppm)	≤ 300	≤ 300	≤ 300
Nilai Kalor	NA	NA	NA
Fusi Abu	NA	NA	NA

Sumber: PFI Standards Committee, 2011

Tabel 2. Standar kualitas pelet kayu DIN (Jerman) dan Ö NORM (Austria)

Sifat Bahan Bakar	Standar Bahan Bakar Untuk Rumah Tangga/Komersil		
	DIN Plus	DIN 57131	Ö NORM M7135
Diameter (mm)	4 – 10	4 – 10	4 – 10
Panjang (mm)	< 5x D	< 50	< 5x D
Kerapatan (g/cm ³)	> 1,12	1,0 – 1,4	> 1,12
Kadar Air (%)	< 10	< 12	< 10
Keteguhan (%)	< 2,3	-	< 2,3
Kadar Abu (%)	< 0,5	< 1,5	< 0,5
Nilai Kalor (MJ/kg)	> 18	17,5 – 19,5	> 18
Kadar Sulfur (%)	< 0,04	< 0,08	< 0,04
Kadar Klorin (%)	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Kadar Nitrogen (%)	< 0,3	< 0,3	< 0,3

Sumber: Hiegl *et.al.*, 2009

Tabel 3. Standar mutu pelet kayu/pelet energi Eropa (EN Plus)

Parameter	ENplus-A1	ENplus-A2	Pengujian berdasarkan
Diameter (mm)	6 – 8	6 – 8	-
Panjang (mm)	$3,5 \leq L \leq 40$	$3,5 \leq L \leq 40$	-
Kerapatan (g/cm^3)	$\geq 0,6$	$\geq 0,6$	EN 15103
Nilai Kalor (MJ/kg)	$\geq 16,5$	$\geq 16,3$	EN 14918
Kadar Air (%)	≤ 10	≤ 10	EN 14774-1
Kadar Abu (%)	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	EN 14775
Kadar Klorin (%)	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	EN 15289
Kadar Sulfur (%)	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	EN 15289
Kadar Nitrogen (%)	$\leq 0,03$	$\leq 0,05$	EN 15104

Sumber: Biomass Pellet Machine

Indonesia telah memilih standar untuk pelet biomassa. Standar tersebut tertera dalam SNI 8951:2020 dengan judul “Pelet Biomassa untuk Pembangkit Listrik”. Standar tersebut dituang dalam sebuah buku yang ditetapkan sejak tanggal 30 Desember 2020 dengan SK penetapan yaitu 783/KEP/BSN/12/2020. Badan Standarisasi Nasional menyatakan bahwa standar tersebut menetapkan persyaratan dan metode uji spesifikasi pelet biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara yang menggunakan jenis *boiler pulverized coal* (PC) atau *circulating fluidized bed* (CFB) atau Stoker dan PLTBm (Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa).

2.4 Torefaksi dan Reaktor *Electric Furnace* (EF)

Salah satu proses yang dapat digunakan untuk meningkatkan viabilitas dan sifat pembakaran biomassa adalah torefaksi. Torefaksi merupakan proses termolisis biomassa dengan kondisi tidak adanya oksigen pada tingkat laju pemanasan yang rendah ($<50^\circ\text{C}/\text{menit}$) dan kisaran suhu yang relatif rendah antara 200°C hingga 300°C (Basu, 23; Thrän *et al.*, 2016). Torefaksi juga dapat disebut sebagai pirolisis ringan (Limousy *et al.*, 2017). Proses perlakuan torefaksi

terdiri dari penguapan uap air, devolatilisasi dan reaksi depolimerisasi terhadap biomassa (Nhuchhen *et al.*, 2014). Hal tersebut didasarkan pada penghilangan oksigen dari biomassa yang bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar dengan kepadatan energi yang lebih tinggi melalui penguraian kandungan hemiselulosa yang reaktif. Torefaksi juga melepaskan zat yang dapat terkondensasi dalam bentuk tar, minyak, air, dan berbagai macam gas termasuk karbon monoksida, karbon dioksida, dan hydrogen (Wulandari *et al.*, 2020). Senyawa lignoselulosa (lignin, selulosa, dan hemiselulosa) mengalami degradasi selama proses torefaksi yang umumnya menyebabkan pelepasan CO₂ serta H₂O (Limousy *et al.*, 2017). Komponen H dan O terurai selama perlakuan panas namun komponen C meningkat (Limousy *et al.*, 2017; Tsai dan Liu, 2013). Hemiselulosa adalah senyawa dalam lignoselulosa yang paling mudah terurai saat torefaksi (Limousy *et al.*, 2017). Produk akhir torefaksi dapat berupa bahan bakar padat mirip dengan arang dan gas yang mudah terbakar. Semua produk akhir torefaksi berbasis hayati dan terbarukan (Gent *et al.*, 2017).

Torefaksi secara historis telah digunakan untuk memanggang biji kopi untuk meningkatkan kerapuhan dan rasa (Gent *et al.*, 2017). Upaya pertama yang dilaporkan sebagai pemanfaatan torefaksi sebagai proses peningkatan kualitas biomassa terjadi di Prancis selama tahun 1930-an dengan meningkatkan sifat kayu sebagai bahan bakar. Saat ini torefaksi dianggap sebagai teknologi pra-pemrosesan yang bertujuan untuk meningkatkan karakteristik bahan bakar sekaligus mengurangi biaya yang terkait dengan penyimpanan, transportasi, dan pengolahan hilir (Marias *et al.*, 2013).

Penelitian terkait torefaksi telah banyak dilakukan. Rubianti *et al.* (2019) menggunakan pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan ditorefaksi selama 3-5 menit pada suhu 200°C, 250°C, dan 300°C. Hasil penelitian melaporkan bahwa torefaksi meningkatkan sifat fisis pelet kayu karet sehingga nilai tambah produk ikut meningkat. Torefaksi dilakukan pada pelet tandan kosong kelapa sawit dengan suhu 280°C selama 20 menit untuk melihat perubahan sifat kimia (Rani *et al.*, 2020). Penelitian tersebut menunjukkan adanya perubahan gugus fungsi yang menandakan terjadinya perubahan komponen kimia selama torefaksi. Hidayat *et*

al. (2020) juga melaporkan bahwa torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan kualitas energi dengan meningkatnya nilai kalor.

Sulistio *et al.* (2020) menggunakan pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*) dan ditorefaksi selama 3 - 5 menit pada suhu 260°C dan 280°C. Sifat higroskopis pelet kayu jabon berubah yang semula hidrofilik (cenderung menyerap air) menjadi hidrofobik (tahan terhadap air). Pah *et al.* (2021) menggunakan pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*). Proses torefaksi dilakukan selama 40 menit pada suhu 280°C. Penelitian tersebut melaporkan bahwa pelet bambu betung hasil torefaksi lebih tahan terhadap air dan kelembaban.

Torefaksi dilakukan dengan menggunakan reaktor *electric furnace* (EF). Menurut Rizal *et al.* (2016), *electric furnace* atau tungku listrik merupakan alat pemanas bahan yang dapat mengubah bentuk sehingga mengalami penggulangan dan penempaan atau mengubah sifat bahan akibat perlakuan panas. Reaktor *electric furnace* (EF) telah digunakan oleh Yulianto *et al.* (2020) untuk mentorefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit pada suhu 280°C selama 20 menit. Torefaksi memberikan keuntungan bagi biomassa dalam penggunaannya sebagai bioenergi namun membutuhkan biaya yang cukup besar untuk membangun reaktor torefaksi dalam skala industri.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada Desember 2021 sampai dengan Januari 2022. Persiapan bahan dan torefaksi dilakukan di *Workshop* Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Pengujian sifat fisis dan mekanik dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis proksimat dilakukan di Laboratorium Daya dan Alat Mesin Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung serta analisis FTIR dilakukan di Laboratorium Inovasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain reaktor *electric furnace* (BJPX - Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia), timbangan analitik dengan ketelitian 1×10^{-4} g, kaliper dengan ketelitian 1×10^{-2} mm, colorimeter (AMT507, Amtast, Qingdao, China), *universal testing machine* (M500-50AT, Testometric, Rochdale, United Kingdom), spektroskopi FTIR (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, United States), aluminium foil, dan kamera. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pelet bambu andong yang diproduksi Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

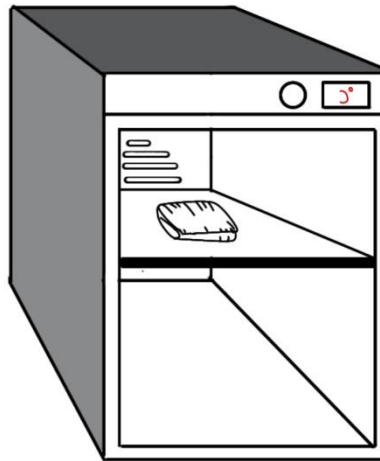
3.3 Penyaringan dan Penyortiran

Pelet bambu andong disaring guna memisahkan pelet dari debu maupun serbuk sisa pelet dan disortir berdasarkan panjang pelet yang digunakan yaitu

2-3 cm. Pelet ditimbang menggunakan timbangan analitik dalam kondisi kering udara dan kering oven.

3.4 Proses Torefaksi dengan Reaktor *Electric Furnace* (EF)

Sampel yang telah disiapkan dibungkus dengan aluminium foil dan diberi lubang sebanyak 5 buah secara random. Torefaksi dilakukan pada suhu 200°C, 240°C, dan 280°C dengan *electric furnace* selama 50 menit. EF dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu yang ditargetkan kemudian sampel dimasukkan selama waktu yang telah ditetapkan.



Gambar 4. Reaktor *electric furnace*.

3.5 Analisis Parameter

3.5.1 Sifat fisis

Sifat fisis yang diuji dalam penelitian ini meliputi warna, kerapatan, kadar air, penyerapan uap air, dan ketahanan terhadap air.

A. Warna

Pengujian warna terhadap pelet bambu andong dilakukan sebelum dan sesudah ditorefaksi. Parameter warna diuji berdasarkan kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), kromatisasi kuning/biru (b^*), dan perubahan warna

secara keseluruhan (ΔE^*). Perubahan ΔE^* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

Keterangan:

(ΔE^*) = perubahan warna akibat perlakuan pemanasan

(ΔL^*) = perbedaan antara nilai (L^*) sebelum dan sesudah setelah perlakuan

(Δa^*) = perbedaan antara nilai (a^*) sebelum dan sesudah perlakuan pemanasan

(Δb^*) = perbedaan antara nilai (b^*) sebelum dan sesudah perlakuan pemanasan

Perubahan warna diklasifikasikan ke dalam 6 rentang nilai pada Tabel berikut.

Tabel 4. Nilai klasifikasi perubahan warna

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

Sumber: Valverde dan Moya, 2014

B. Kerapatan

Kerapatan pada umumnya dinyatakan dalam perbandingan massa dan volume, yaitu dengan cara menimbang dan mengukur volume dalam keadaan kering udara. Kerapatan briket dapat dihitung dengan menggunakan standar (SNI 8021-2014), dengan rumus persamaan berikut.

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

Keterangan:

KR = kerapatan (g/cm^3)

m = massa pelet (g)

v = volume (cm^3)

C. Kadar air

Prinsip penetapan kadar air adalah menguapkan bagian air bebas yang terdapat di dalam bahan sampai terjadi keseimbangan antara kadar air bahan dengan udara sekitar menggunakan energi panas. Pengujian kadar air dilakukan berdasarkan standar SNI 8675:2018. Berat kering udara dan berat kering oven diukur untuk menentukan kadar air sampel sebelum dan setelah torefaksi. Kadar air (KA) dihitung dengan persamaan berikut

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

Keterangan:

KA = kadar air (%)

BA = berat awal (g)

BKO = berat kering oven (g)

D. Penyerapan uap air

Penyerapan uap air dilakukan dengan menempatkan sampel di suhu ruangan. Sampel diukur pertambahan bobot selama 30 hari hingga mencapai berat konstan.

E. Ketahanan terhadap perendaman air

Uji ketahanan terhadap air dilakukan dengan merendam pelet bambu andong ke dalam air dan dilihat perubahan visual yang terjadi pada pelet bambu andong setelah perendaman selama 1 menit, 5 menit, 30 menit, 1 jam, 6 jam, 12 jam, 24 jam, dan 72 jam.

3.5.2 Sifat Mekanis

Sifat mekanis yang diuji yaitu kekuatan tekan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine (UTM) Testometric M500-50AT*. Kedua sisi pelet dihaluskan dan diratakan kemudian diletakkan secara vertikal pada logam UTM dan diberi tekanan hingga sisi pelet mengalami keretakan.

3.5.3 Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui efisiensi pembakaran suatu biomassa (pelet bahan bakar). Biomassa terdiri dari beberapa komponen seperti zat mudah menguap (*volatile matter*), abu (*ash*), dan karbon terikat (*fixed carbon*).

3.5.4 Nilai Kalor

Pengukuran nilai kalor dilakukan dengan menggunakan *bomb calorimeter* PARR 1331 *Plain Jacket* berdasarkan standar KS E 3707.

3.5.5 Analisis FTIR

Pengujian FTIR menggunakan spektroskopi FTIR (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, United States). Sampel dihaluskan hingga menjadi bubuk kemudian dicampur dengan KBr dan dipadatkan. Sampel yang telah padatkan dianalisis dengan *infrared* untuk melihat gugus kimia yang terdapat pada setiap gelombang.

3.6 Analisis Deskriptif

Statistik deskriptif merupakan analisis statistik yang memberikan gambaran secara umum mengenai karakteristik dari masing-masing variabel penelitian yang dilihat dari nilai rata-rata (mean), maksimum, minimum, dan standar deviasi.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Simpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah.

1. Torefaksi menyebabkan warna berubah total. Kadar air terendah sebesar 6,90% diperoleh pada pelet torefaksi suhu 280°C. Disintegrasi bentuk tidak terjadi pada pelet torefaksi setelah mengalami perendaman selama 72 jam. Pelet kontrol lebih mudah menyerap uap air dibandingkan pelet toeraksi. Nilai kuat tekan terbesar diperoleh pada pelet torefaksi suhu 200°C.
2. Peningkatan suhu torefaksi menyebabkan penurunan kadar zat mudah menguap namun kadar abu pada suhu 280°C mengalami peningkatan. Peningkatan kadar karbon terikat dan nilai kalor sejalan dengan peningkatan suhu torefaksi.

5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini adalah diperlukan variasi jenis biomassa lebih lanjut dalam pengembangan pelet berbasis biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

- Abineno, J.C., Koylal, J.A. 2018. Gasifikasi limbah tempurung kemiri sebagai energi alternatif menggunakan updraft gasifier pada laju aliran udara berbeda. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 7(3): 175-180.
- Acquah, G.E., Via, B.K., Fasina, O.O., Eckhardt, L.G. 2016. Rapid quantitative analysis of forest biomass using fourier transform infrared spectroscopy and partial least squares regression. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2016: 1-10. DOI: 10.1155/2016/1839598
- Ajimotokan, H.A., Ehindero, A.O., Ajao, K.S., Adeleke, A.A., Ikubanni, P.P., Shuaib-Babata, Y.L. 2019. Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African*. 6: 1-9. DOI: 10.1016/j.sciaf.2019.e00202
- Akmal, I., Arimbi, N., Primasanti, N., Sawitri, W., Kusumawardhani, D., Soraya, D. 2011. *Bambu untuk Rumah Modern*. Buku. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 96 hlm.
- Alamsyah, R., Siregar, N.C., Hasanah, F. 2016. Peningkatan nilai kalor pellet biomassa cocopeat sebagai bahan bakar terbarukan dengan aplikasi torefaksi. *Jurnal of Agro-based Industry*. 33(1): 17-23.
- Alvarez, J.G., Moya, R., Urbina, A.P., Zuñiga, A.R. 2017. physical and compression of pellets manufactured with the biomass of the woody tropical spices of costa rica torrefied at different temperatures and times. *Energies*. 10:1-17. DOI:10.3390/en10081205
- Amrita, R. 2018. *Pellet Kayu Energi Hijau Masa Depan*. Buku. Mulawarman University Press. Samarinda. 93 hlm.
- Azhar., Rustamaji, H. 2009. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29.
- Bach, Q.V., Skreiberg, Ø., Lee, C.J. 2017. Process modeling and optimization for torrefaction of forest residues. *Journal of Energy Procedia*. 138: 348-354.

- Badan Standarisasi nasional (BSN). 2020. Pelet Biomassa Untuk Pembangkit Listrik. <http://sispk.bsn.go.id/> (Diakses pada 17 November 2021).
- Bahtiar, E.T., Nugroho, N., Surjokusumo, S., Karlinasari, L., Nawawi, D.S., Lestari, D.P. 2016. Pengaruh komponen kimia dan ikatan pembuluh terhadap kekuatan tarik bambu. *Jurnal Teoretis dan Pengantar Bidang Rekayasa Sipil*. 23(1): 31-40.
- Bahtiar, E.T., Imanullah, A.P., Hermawan, D., Nugroho, N., Abdurachman. 2019. Structural grading of three sympodial bamboo culms (hitam, andong, and tali) subjected to axial compressive load. *Engineering Structures*. 181:233-245. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.026
- Barly, Ismanto, A., Martono, D., Abdurachman, Andianto. 2012. Sifat fisis dan stabilisasi dimensi beberapa jenis bambu komersial. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 30(3): 163-170.
- Basu, P. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction 2nd Edition*. Academic Press. Boston. 39 hlm.
- Biomass Pellet Machine. 2012. DIN Plus Pellets or EN Plus Pellets. <https://www.biopelletmachine.com/biopellet-making-guidance/wood-pellet-certification-standard.html> (diakses pada 08 Oktober 2021).
- Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., Rossi, C. 2017. Biomass: an overview. *Journal Of Bioenergy Systems for the Future*. 3-42.
- Bourgonje, Z.C., Veringa, H.J., Smeulders, D.M.J. 2017. The new method to characterize the gas emissions during torrefaction realtime. *Fuel Processing Technology*. 164: 24–32. DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.04.009
- Bui, Q.B., Grillet, A.C., Tran, H.D. 2017. A bamboo treatment procedure: effects on the durability and mechanical performance. *Sustainability*. 9(9): 1444-1455.
- Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zen, Z., Wang, J., Lu, M. 2015. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*. 159:27–32.
- Chen, W., Lin, B., Lin, Y., Chu, Y., Ubando, A.T., Show, P.L., Ong, H.C., Chang, J., Ho, S., Culaba, A.B., Pétrissans, A., Pétrissans, M. 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*. 82: 25-34. DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100887

- Chen, W.H., Lin, B.J., Colin, B., Chang, J.S., Petrissans, A., Bi, X. Petrissans, M. 2018. Hygroscopic transformation of woody biomass torrefaction for carbon storage. *Applied Energy*. 231: 768-776.
- da Silva, C.M.S., Vital, B.R., Carneiro, A.D.C.O., Costa, E.V.S., de Magalhães, M.A., Trugilho, P.F. 2017. Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. *Industrial Crops and Product*. 109: 598-602.
- Febrianto, F., Sumardi, I., Hidayat, W., Maulana, S. 2017. *Papan Untai Bambu Berarah: Material Unggul untuk Komponen Bahan Bangunan Struktur*. IPB Press. Bogor. 159 hlm.
- Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C.J., Bi, X., Kim, C.S., Sokhansanj, S. 2014. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification. *Applied Energy*. 134:133–142. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.076
- Granados, D. A., Chejne, F., Basu, P. 2016. A two dimensional model for torrefaction of large biomass particles. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 120: 1-14. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.02.016
- Gent, S., Twedt, M., Gerometta, C., Almberg, E. 2017. Chapter one-introduction to thermochemical conversion process. *Theoretical and Applied Aspects of Biomass Torrefaction*. 1-16. DOI: 10.1016/B978-0-12-809483-9.00001-4
- Haris, A. 2008. *Pengujian Sifat Fisis Dan Mekanis Buluh Bambu Sebagai Bahan Konstruksi Menggunakan ISO 22157-1:2004*. Skripsi. Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor. Bogor. 64 hlm.
- Hariz, T.M.R., Santosa, I.A., Maulana, M.I., Marwanto, Prasetya, D., Hidayat, W., Lubis., M.A.R., Kim, N.H., Febrianto, F. 2021. Effects of resin content on the characteristics of bamboo oriented strand board prepared from strands of betung, ampel, and their mixtures. *Jurnal Sylva Lestari*. 9(3):454-465.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021b. Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering And Management*. 8(1): 33-42.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D.A. Kim, S.D., Lee, S.H., Yoo, J.H. 2021. Valorization of Indonesian wood wastes through pyrolysis: a review. *Energies*. 14(5): 1407-1432. DOI: 10.3390/en14051407

- Hendra, D. 2011. Pemanfaatan eceng gondok (*Eichornia crassipes*) untuk bahan baku briket sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 29(2):189-210.
- Hermawati, W., Mahmudi, Rosaira, I.M.I., Alamsyah, P. 2014. *Konversi Biomassa untuk Energi Alternatif di Indonesia: Tinjauan Sumber Daya, Teknologi, Manajemen, dan Kebijakan*. Buku. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Jakarta. 224 hlm.
- Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Haryanto, A., Amrul, Kim, S., Lee, S. 2018b. Torrefaction of wood pellets using counter flow multi-baffle (COMB) technology. in: Annual International Symposium of Institute of Forest Science (KNUIFS 2018) KNU Institute of Forest Science, Chuncheon, Republic of Korea.
- Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Lee, S.H., Kim, S.D., Yoo, J.H., 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., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H.M., Kondo, T., Kim, N.H. 2016. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of The Faculty of Agriculture*. 2(1): 145-152.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2016. Effect of treatment duration and clamping on the properties of heat-treated okan wood. *BioResources*. 11(4): 10070-10086.-DOI: 10.15376/biores.11.4.10070-10086.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Park, B.H., Banuwa, I.S., Febrianto, F., 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. Doi: 10.5658/WOOD.2017.45.2.213
- Hiegl, W., Janssen, R., Pichler, W. 2009. *Advancement of Pellets-related European Standards*. WIP Renewable Energies. Holzforschung. 26 hlm.
- Hroncova, E., Ladomerskya, J., Puskajlerb, J. 2014. Emission of pollutants from torrefaction of wood. *European Journal of Environmental and Safety Sciences*. 2(1): 19-22
- Iskandar, T., Rofiatin, U. 2017. Karakteristik biochar berdasarkan jenis Biomassa dan parameter proses pyrolysis. *Jurnal Teknik Kimia*. 12(1): 28-34.

- Kahariyadi, A., Setyawati, D., Nurhaida, Diba, F., Roslinda, E. 2015. Kualitas arang briket berdasarkan persentase arang batang kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dan arang kayu laban (*Vitex pubescens* Vahl.). *Jurnal Hutan Lestari*. 3(4): 561-568.
- Khaidir. 2016. Pengolahan limbah pertanian sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Agrium*. 13(2): 63-68.
- Kumar, S., Lange, J.P., Rossum, G.V., Kersten, S.R.A. 2014. Liquefaction of lignocellulose: process parameter study to minimize heavy ends. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry Research*. 53(29): 11668-11676.
- Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., Obersteiner, M., 2014. Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy*. 66: 19-31.
- Lee, E.Y., Lim, K.I., Lim, J.K., Lim, S.T. 2000. Effects of gelatinization and moisture content of extruded starch pellets on morphology and physical properties of microwave-expanded products. *Journal of Cereal Chemistry*. 77(6): 769-773.
- Lee, S. H., Yoo, J. H., Yoon, K. D. 2019. Cooperation Projects with UNILA & Central Lampung Government. in: Technical Workshop Lampung Tengah, 4 April 2019.
- Lestari, V.A., Priambodo, T.B. 2020. Kajian komposisi lignin dan selulosa dari limbah kayu sisa dekontikasi rami dan cangkang kulit kopi untuk proses gasifikasi downdraft. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 16(1) : 1-8.
- Li, M.F., Li, X., Bian, J., Chen, C.Z., Yu, Y.T., Sun, R.C. 2015. Effect of temperature and holding time on bamboo torrefaction. *Biomass and Bioenergy*. 83:366-372.
- Limousy, L., Jeguirim, M., Labaki, M. 2017. Energy application of coffee processing by-products. *Sustainable Applications*. 11:323-367. DOI: 10.1016/B978-0-12-811290-8.00011-6
- Lunguleasa, A., Ayrilmis, N., Spirchez, C., Croitoru, C. 2019. Increasing the calorific properties of sawdust waste from pellets by torrefaction. *BioResources*. 14(4): 7821-7839.
- Malik, U. 2013. Alternatif pemanfaatan limbah industri pengolahan kayu sebagai arang briket. *Jurnal Aplikasi Teknologi*. 5(1): 63-70.
- Mamvura, T.A. Pahla, G., Muzenda, E. 2018. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *South African Journal of Chemical Engineering*. 25:1-12. DOI: 10.1016/j.sajce.2017.11.003

- Marias, F., Casajus, C., Torrefaction of corn stover in macro-thermobalance: influence of operating conditions. *Waste Biomass Valorization*. 5: 157-164. DOI: 10.1007/S12649-013-9235-x.
- Martynis, M., Sundari, E., Sari, E. 2012. Pembuatan biobriket dari limbah cangkang kakao. *Jurnal Litbang Industri*. 2(1): 35-41.
- Matali, S., Rahman, N.A., Idris, S.S., Yaacob, N., Alias, A.B. 2016. Lignocellulosic biomass solid fuel properties enhancement via torrefaction. *Procedia Engineering*. 148: 671-678. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.550
- Matangaran, J.R., Partiani, T., Purnamasari, D.R. 2013. Exploitation factor and quantification of wood waste in order to improve efficiency of natural forest harvesting (in Bahasa Indonesia). *Jurnal Bumi Lestari*.13: 384-393.
- Maulana, M.I., Jeon, W.S., Purusatama, B.D., Nawawi, D.S., Nikmatin, S., Sari, R.K., Hidayat, W., Febrianto, F., Kim, J.H., Lee, S.H., Kim, N.H. 2021a. Variation of anatomical characteristics within the culm of the three *gigantochloa* species from indonesia. *BioResources*. 16(2): 3596-3606. DOI: 10.15376/biores.16.2.3596-3606
- Medic, D., Darr, M., Shah, A., Rahn, S. Effect of torrefaction on water vapor adsorption properties and resistance to microbial degradation of corn stover. *Energy&Fuels*. 26:2386-2393. DOI: 10.1021/ef3000449
- Murti, G.W. 2018. Pengaruh campuran pelarut etanol-air pada likuifaksi biomassa lignoselulosa. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 14(1): 11-22.
- Moroz, J.G., Lissel, S.L., Hagel, M.D. 2014. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. *Construction and Building Material*. 61: 125–137.
- Mustamu, S., Hermawan, D., Pari, G. 2018. Karakteristik biopellet dari limbah padat kayu putih dan gondorukem. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 36(3): 191-204.
- Nawawi, D.S., Carolina, A., Saskia,T., Darmawan, D., Gusvina, S.L., Wistara,N.J., Sari, R.K., Syafii, W. 2018. Karakteristik kimia biomassa untuk energi. *Jurnal Ilmu Teknologi Kayu Tropis*. 16(1): 44-51.
- Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B. 2014. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*. 2014: 1-56,. DOI: 10.5171/2014.506376.
- Ngo, T.N.L.T., Chiang, K.Y. 2021. Co-thermal degradation characteristics of rice straw and sewage sludge. *Sustainable Environment Research*. 31: 1-14. DOI: 10.1186/s42834-021-00096-6

- Nur, M.S., Jusuf, J. 2014. *Biomassa Bahan Baku dan Teknologi Konversi Untuk Energi Terbarukan*. Buku. PT Insan Fajar Mandiri Nusantara. Bogor. 53 hlm.
- Onchieku, J.M., Chikamai, B.N., Rao, M.S. 2012. Optimum parameters for the formulation of charcoal briquettes using bagasse and clay as binder. *European Journal of Sustainable Development*. 1(3): 477-477.
- Pah, J.M., Suryanegara, L., Haryanto, A., Hasaunin, U., Iryani, D.A., Wulandari, C., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hidayat, W. 2021. Product characteristics from the torrefaction of bamboo pellets in oxidative atmosphere. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass*. 202:185-189. DOI: 10.2991/aer.k.210603.032
- Pahla, G., Ntuli, F., Muzenda, E. 2018. Torrefaction of landfill food waste for possible application in biomass co-firing. *Journal of Waste Management*. 71: 512–520.
- Parinduri, L., Parinduri, T. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electronic Technology*. 5(2): 88-92.
- Park, S.H., Jang, J.H., Wistara, N.J., Febrianto, F., Lee, M. 2019. Fuel properties of indonesian bamboo carbonized at different temperatures. *BioResources*. 14(2):4224-4235.
- Park, S.Y., Kim, S.J., Oh, K.C., Cho, L.H., Kim, M.J., Jeong, I.S., Lee, C.G., Kim, D.H. 2020. Characteristic analysis of torrefied pellets: determining optimal torrefaction conditions for agri-byproduct. *Energies*. 13: 423 437. DOI:10.3390/en13020423
- Park, S., Lee, M., Febrianto, F., Wistara, N.J. 2021. Effects on morphology and chemical properties of indonesian bamboos by carbonization. *Jurnal Sylva Lestari*. 9(2):190-201.
- Park, J., Meng, J., Lim, K. H., Rojas, O. J., Park, S. 2013. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 100: 199-206. DOI: 10.1016/j.jaap.2012.12.024
- PFI Standards Committee. 2011. *Pellet Fuels Institute Standard Specification for Residential/Commercial Densified Fuel*. The Pellet Fuel Institute. Kentucky.
- Rajnai, E.B., Wang, L., Sebestyén, Z., Barta, Zs., Khalil, R., Skreiberg, Ø., Grønli, M., Jakab, E., Czégénya, Z. 2017. Effect of temperature and duration of torrefaction on the thermal behavior of stem wood, bark, and stump of spruce. *Journal of Energy Procedia*. 105: 551–556.

- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iriani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(1): 63-70
- Riastuti, R.D., Febrianti, Y., Panjaitan, T. 2019. Eksplorasi jenis bambu di Kecamatan Rawas Ulu Kabupaten Muratara. *Jurnal Bioedusains*. 2(1): 13-25.
- Riaza, J., Gibbins, J., Chalmers, H. 2017. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*. 202:650–655.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y. Firmansyah, F. 2019. Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang asap cair yang dihasilkan. *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 20(1): 18-27.
- Rizal, A., Samantha, Y., Rachmat, A. 2016. Pembuatan tungku pemanas (muffle furnace) kapasitas 12000°C. *Jurnal J-Ensitem*. 2(2): 13-16.
- Rubianti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor counter-flow multi baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331.
- Rusdianto, A.S., Choiron, M., Novijanto, N. 2014. Karakterisasi limbah industri tape sebagai bahan baku pembuatan biopelet. *Jurnal Industrialisasi*. 1(3): 27-32.
- Sadaka, S., Negi, S. 2009. Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 28 (3): 427–434.
- Salca, E.A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., Suzuki, S. 2016. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. *Journal of Wood Science*. 62(4): 297–304. DOI: 10.1007/s10086-016-1558-3
- Salim, R. 2016. Karakteristik dan mutu arang kayu jati (*Tectona grandis*) dengan sistem pengarangan campuran pada metode tungku drum. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 8(2): 53-64.
- Soenarno, Endom, W., Basari, Z., Suhartana, S., Dulsalam, Yuniawati. 2016. Faktor eksploitasi hutan di Sub Region Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 34(4): 335-348.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, L., Henriksen, U.B. 2011. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass & Bioenergy*. 35(11): 4690–4698.

- Sucipta, M., Negara, D.N.K.P., Nindhia, T.G.T., Surata, I.W. 2017. Characteristics of ampel bamboo as a biomass energy source potential in Bali. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 201 012032.
- Suganal, S. Hudaya. G.K. 2019. Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa torefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 15(1): 31-48.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Hassanudin, U., Yoo, J.H., Kim, S.D., Lee., S.H., Hidayat, W., 2020. Pengaruh torefaksi dengan reaktor counter-flow multi baffle (COMB) dan electric furnace terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*. 8(1): 65-76.
- Sunardi, S., Djuanda, D., 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.
- Suriani, E. 2017. Bambu sebagai alternatif penerapan material ekologis: potensi dan tantangannya. *EMARA Indonesian Journal of Architecture*. 3(1): 33-42.
- Sutardi, S.R., Nadjid, N., Muslich, M., Jasni., Sulastiningsih, I.M. Komariyati, S. 2015. *Seri Paket Iptek Informasi Sifat Dasar dan Kemungkinan Penggunaan 10 Jenis Bambu*. Institut Pertanian Bogor Press. Bogor. 57 hlm.
- Thaim, T., Rasid, R.A. 2016. Improvement empty fruit bunch properties through torrefaction. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 10: 114-121.
- Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., Ndibe, C., Koppejan, J., Alakangas, E., Majer, S., Schipfer, F. 2016. Moving torrefaction towards market introduction—technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the sector project. *Biomass & Bioenergy*, 89: 184-200.
- Tkemaladze, G.S., Makhshvili, K.A. 2016. Climate changes and photosynthesis. *Annals of Agrarian Science*. 14(2): 119-126.
- Tsai, W.T., Liu, S.C. 2013. Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 102: 47-52.
- Tursi, A. 2019. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*. 22: 962-979.

- Valverde, J. C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata*, and *Tectona grandis* wood with two coating. *Color Research and Application*. 39(5): 519–529 hlm.
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudlsson, M., Nielsen, H.K. 2020. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy&Fuels*. 34(12): 15343-15354. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.0c02671](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02671)
- Wibowo, S. Lestari, N. 2018. Effect of peanut shell torrefaction on qualities of the produced bio-pellet. *Jurnal Reaktor*. 18(4): 183-193.
- Widjaja, E.A., Karsono. 2005. Keanekaragaman bambu di Pulau Sumba. *Jurnal Biodiversitas*.6 (2): 95-99.
- Widjaja, E.A., Ervianti, D., Kusumaningtyas, H. 2020. *Buku Saku Idenifikasi Bambu*. Buku. Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan. Jakarta. 44 hlm.
- Wijayanti, W., Sasongko, M.N., Meidiana, C., Yuliati, L. 2013. Metode pirolisis untuk penanganan sampah perkotaan sebagai penghasil bahan bakar alternatif. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 4(2): 85-92.
- World Bioenergy Association. 2018. WBA Global Bioenergy Statistics 2018 Summary Report. www.worldenergy.org (Diakses pada 13 Februari 2022).
- Wulandari, W., Jahsy, N.A., Tandias, A.H., Rizkiana, J., Rubani, I.S., Saputera, W.H., Sasongko, D. 2020. Torrefaction of rubberwood waste: the effects of particle size, temperature & residence time. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 52(2): 137-152.
- Yoshida, T., Kuroda, K., Kamikawa, D., Kubojima, Y., Nomura, T., Watada, H., Sano, T., Ohara, S. 2021. Water resistance of torrefied wood pellets prepared by different methods. *Energies*. 14(6):1618-1628. DOI: [10.3390/en14061618](https://doi.org/10.3390/en14061618)
- Yuliah, Y., Suryaningsih, S., Ulfi, K. 2017. Penentuan kadar air hilang dan volatile matter pada bio-briket dari campuran arang sekam padi dan batok kelapa. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*. 1(1): 51-57.
- Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan koosng kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(2): 104-111