

**PENINGKATAN KUALITAS BAHAN BAKAR PADAT DARI
BIOMASSA BAMBU MELALUI TOREFAKSI**

(Tesis)

Oleh

**JACKY MICHAEL PAH
1824151001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022**

**PENINGKATAN KUALITAS BAHAN BAKAR PADAT DARI
BIOMASSA BAMBU MELALUI TOREFAKSI**

Oleh

JACKY MICHAEL PAH

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
MAGISTER KEHUTANAN**

pada

**Program Studi Magister Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PENINGKATAN KUALITAS BAHAN BAKAR PADAT DARI BIOMASSA BAMBU MELALUI TOREFAKSI

Oleh

Jacky Michael Pah

Energi baru dan terbarukan dari biomassa khususnya dari biomassa bambu sangat potensial untuk masa depan dan pilihan yang menarik untuk menggantikan kayu karena pertumbuhannya yang cepat, produktivitas yang tinggi, dan karakteristik bahan bakar yang penting seperti kadar abu yang rendah, indeks alkali, dan nilai kalor yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh torefaksi terhadap sifat fisik pelet bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*) dan betung (*Dendrocalamus asper*). Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Juli – Oktober 2020.

Torefaksi pelet bambu dilakukan menggunakan *electric furnace* (EF) pada suhu 280°C dengan waktu tinggal 40 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi menyebabkan penurunan kadar air pelet bambu. Torefaksi menyebabkan terjadinya perubahan warna secara visual yang semakin gelap pada pelet andong dan pelet betung. Uji ketahanan air dan adsorpsi air menunjukkan bahwa pelet torefaksi lebih tahan terhadap air dan kelembaban relatif daripada pelet tanpa torefaksi, yang bermanfaat ketika pelet disimpan untuk waktu yang lama dan dalam kondisi lembab.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa densitas pelet bambu menurun setelah dilakukan torefaksi sebesar 10 – 16%. Nilai kalor setelah torefaksi juga mengalami peningkatan sebesar 10 – 13% dari pellet tanpa torefaksi. Biomassa bambu berpotensi sebagai bahan baku pelet dilihat dari nilai kadar air dan kerapatan serta nilai kalor pelet bambu andong dan betung memenuhi Standar Nasional Indonesia.

Kata kunci: *Dendrocalamus asper*, *Electric furnace*, *Gigantochloa pseudoarundinacea*, Pelet bambu, Torefaksi,

ABSTRACT

SOLID FUEL QUALITY IMPROVEMENT FROM BAMBOO BIOMASS THROUGH TOREFACTION

by

JACKY MICHAEL PAH

New and dispersed energy from biomass in particular from bamboo biomass is very potential for the future and an alluring decision for wood-coupling because of its quick development, high efficiency, and significant fuel qualities, for example, low debris content, salt file, and high calorific worth. The point of this study was to portray the impact of torrefaction on the actual properties of andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*) and betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. This exploration was led in July - October 2020.

Torrefaction of bamboo pellets was done utilizing an electric heater (EF) at a temperature of 280°C with a home season of 40 minutes. The outcomes showed that torrefaction caused a diminishing in the water content of bamboo pellets. Torrefaction causes a more obscure visual variety change in the andong and betung pellets. Air obstruction and air adsorption tests showed that torrefaction pellets were generally more impervious to air than pellets without torrefaction, which is valuable when pellets are put away for quite a while and under muggy circumstances.

The outcomes likewise showed that the density of bamboo pellets diminished after torrefaction by 10-16%. The calorific worth after torrefaction likewise expanded by 10-13% from pellets without torrefaction. Bamboo biomass is evaluated from the substance of natural substance for pellets, seen from the calorific worth of bamboo andong and betung bamboo pellets that fulfill the Indonesian National Guideline.

Keywords: Bamboo pellets, *Dendrocalamus asper*, Electric Furnace, *Gigantochloa pseudoarundinacea*, Torrefaction,

Judul Tesis : **PENINGKATAN KUALITAS BAHAN
BAKAR PADAT DARI BIOMASSA BAMBU
MELALUI TOREFAKSI**

Nama Mahasiswa : **Jacky Michael Pah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1824151001**

Program Studi : **Magister Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**



Pembimbing Kedua

Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
NIP. 19650527 199303 1 002

Pembimbing Ketiga

Dr. Lisman Suryanegara
NIP. 19750209 200012 1 002

2. **Ketua Program Magister Kehutanan**

Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si.
NIP. 19760123 200604 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

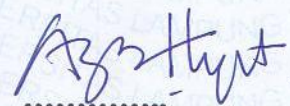
Ketua

: **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut, M.P.**



Sekretaris I

: **Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.**



Sekretaris II

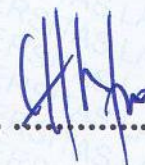
: **Dr. Lisman Surayanegara**



Penguji I

Bukan Pembimbing

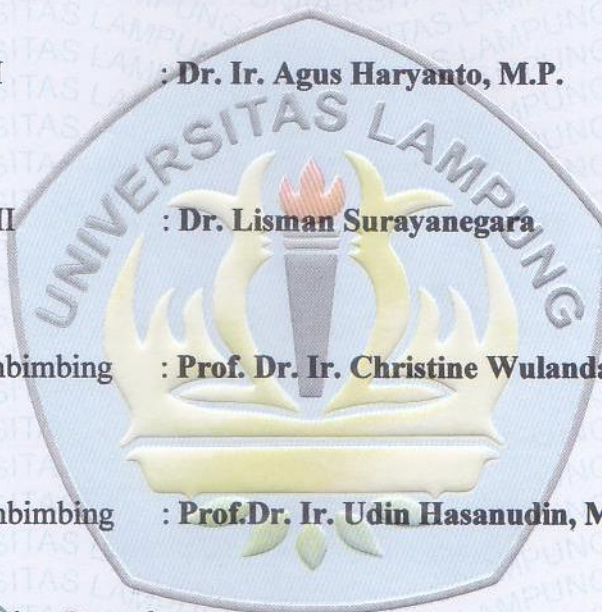
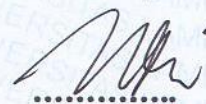
: **Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P.**



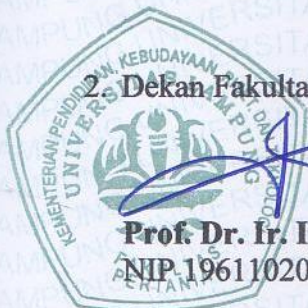
Penguji II

Bukan Pembimbing

: **Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.Sc.**



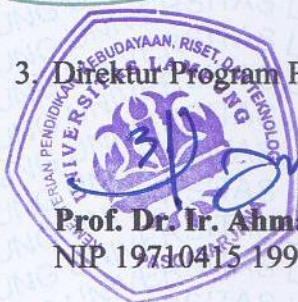
2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.

NIP.19611020 198603 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.Si.

NIP 19710415 199803 1 005

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **10 Juni 2022**

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa: Tesis dengan judul **“KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAS ILAHAN MENGGUNAKAN PEMODELAN SWAT (*Soil Water Assesment Tools*)”** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atas karya penulisan lain dengan cara tidak sesuai dengan norma etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.

1. Pembimbing penulisan tesis ini berhak mempublikasikan sebagian atau seluruh tesis ini pada jurnal ilmiah dengan mencantumkan nama saya sebagai salah satu penulisnya.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya dan saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Juni 2022
Pembuat pernyataan,



JACKY MICHAEL PAH
1824151001

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kefamenanu pada tanggal 17 Juli 1979 dari pasangan Demetrius Pah (Almarhum) dan Suzana Pah Lende (Almarhumah). Penulis merupakan anak kelima dari tujuh bersaudara. Penulis menikah dengan Agustina D. Siahaan, S.Hut,M.Si dan dikaruniai 2 (dua) orang anak dengan nama Ivander Caleb Hasiholan Pah dan Ioanna Clea Haradoi Pah.

Pendidikan dasar hingga menengah atas penulis tempuh di Kefamenanu. Tahun 1997 penulis lulus dari SMUN I Kefamenanu dan kemudian melanjutkan ke Institut Pertanian Bogor. Penulis diterima di Jurusan Konservasi Sumberdaya Hutan, Fakultas Kehutanan dan menyelesaikan studi sarjana pada tahun 2003.

Pada tahun 2010, penulis diangkat menjadi Pegawai Negeri Sipil (PNS) di Dinas Pertanian, Perkebunan dan Kehutanan Kabupaten Pringsewu. Kemudian pada tahun 2017 penulis mutase ke Dinas Kehutanan Provinsi Lampung dan ditempatkan sebagai Penyuluh Kehutanan di UPTD KPH Pesawaran. Pada tahun 2018 penulis berkesempatan untuk melanjutkan Pendidikan Magister dan terdaftar sebagai mahasiswa Magister Kehutanan Fakultas Pertanian (FP) Unila melalui jalur reguler. Selama menjadi mahasiswa pascasarjana penulis telah menghasilkan karya ilmiah berupa tulisan ilmiah dengan judul “Product Characteristics from the Torrefaction of Bamboo Pellets in Oxidative Atmosphere” (Tahun 2019) .

*Karya kecil ini kupersembahkan untuk kedua orang tuaku tercinta yang telah
berbahagia di Surga, Istriku Tercinta Agustina D. Siahaan serta
anak-anaku tersayang Abang Caleb dan Ade Clea*

SANWACANA

Puji syukur yang selalu terucap ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa, karena atas berkat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Padat Dari Biomassa Bambu Melalui Torefaksi” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Kehutanan di Universitas Lampung. terselesaikannya penulisan Tesis ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dorongan dari berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan terimakasih yang tulus kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Karomani, M.Si., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan pembimbing akademik atas bimbingan, motivasi, saran dan kritik yang diberikan.
5. Bapak Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si., selaku Ketua Program Studi Magister Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis sampai proses penulisan tesis ini selesai.
6. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut, M.Sc., selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis mulai dari penyusunan proposal penelitian sampai proses penulisan tesis ini selesai.

7. Bapak Dr. Ir. Agus Harjanto, M.S., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis mulai dari penyusunan proposal penelitian sampai proses penulisan tesis ini selesai.
8. Bapak Dr. Lisman Suryanegara., selaku dosen pembimbing ketiga yang telah memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis mulai dari penyusunan proposal penelitian sampai proses penulisan tesis ini selesai.
9. Ibu Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P., selaku penguji 1 (satu) tesis atas saran yang telah diberikan dalam proses penyelesaian tesis ini.
10. Bapak Prof.Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.Sc., selaku penguji 2 (dua) tesis atas saran yang telah diberikan dalam proses penyelesaian tesis ini.
11. Segenap Dosen Program Magister Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan.
12. Dinas Kehutanan Provinsi Lampung dan UPTD KPH Pesawaran yang telah memberikan kesempatan ijin belajar kepada penulis.
13. Istri tercinta Agustina D, Siahaan dan anak-anak tercinta Ivander Caleb Hasiholan Pah dan Ioanna Clea Haradoi Pah.
14. Alawiyah, Nano dan Apri teman satu Angkatan di Magister Kehutanan 2018, terimakasih atas dukungan yang diberikan.
15. Serta semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian dan penyelesaian tesis mulai dari awal hingga akhir, yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kata sempurna, tetapi penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Bandar Lampung, Juni 2022
Penulis,

Jacky Michael Pah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Kerangka Pemikiran.....	1
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Biomassa	6
2.2. Potensi Biomassa	6
2.3. Potensi Bambu sebagai Biomassa di Indonesia	8
2.4. Klasifikasi dan Sifat Kimia Bambu	11
2.5. Kekurangan Bahan Bakar Biomassa.....	12
2.6. Densifikasi	14
2.7. Torefaksi	17
III. METODE PENELITIAN	21
3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian	21
3.2. Bahan dan Alat.....	21
3.3. Persiapan Bahan.....	21
3.4. Proses Torefaksi.....	22
3.5. Pengujian Pelet Bambu Sebelum dan Sesudah Torefaksi.....	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1. Dimensi Pelet	26
4.2. Perubahan Warna	27
4.3. Kadar Air	28
4.4. Kerapatan	29
4.5. Hidropobisitas	30

	ii
4.6. Nilai Kalor	33
V. KESIMPULAN	36
DAFTAR PUSTAKA	37

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik Bahan Bakar dan Nilai Kalor beberapa Jenis Bambu	8
2. Perbandingan Karakteristik Bioenergi Beberapa Sumber Biomassa	9
3. Sifat Kimia Bambu Andong	10
4. Sifat Kimia Bambu Betung	11
5. Spesifikasi Standar Pelet Biomassa	15
6. Dimensi Pelet Bambu Andong dan Betung	24
7. Parameter Warna Pelet Bambu Andong dan Betung Sebelum dan Sesudah Torefaksi	25
8. Nilai Kadar Air Pelet Andong dan Betung	26
9. Nilai Kerapatan Pelet Andong dan Betung	27

DAFTAR GAMBAR

GambarHalaman
1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran	4
2. Sumber Daya Bambu di Indonesia dan Beberapa Negara di Asia	7
3. Diagram Alir Proses Pembuatan Pelet Bambu Andong dan Betung	20
4. Warna Pelet Bambu Sebelum dan Sesudah Torefaksi	25
5. Adsorpsi Uap Air Pelet Andong Sebelum dan Sesudah Torefaksi	31
6. Adsorpsi Uap Air Pelet Andong Sebelum dan Sesudah Torefaksi	31
7. Hasil Uji Perendaman Air Pada Pelet Andong Sebelum dan Setelah Torefaksi.....	31
8. Hasil Uji Perendaman Air Pada Pelet Andong Sebelum dan Setelah Torefaksi.....	32
9. Nilai Kalor Pelet Andong dan Pelet Betung Sebelum dan Sesudah Torefaksi	33

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 2030, Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca menjadi 29% secara mandiri, dan hingga 38% dengan kerjasama dan dukungan internasional berdasarkan Perjanjian Paris 2015 (Hilmawan et al., 2021). Selain itu, di tahun 2014 pemerintah merevitalisasi Kebijakan Energi Nasional yang menetapkan target untuk tidak hanya mencapai elektrifikasi mendekati 100 persen pada tahun 2020 dari tingkat saat ini sebesar 96%, tetapi juga untuk mencapai 23% bauran energi nasional pada tahun 2025 yang bersumber dari energi baru dan terbarukan termasuk biomassa.

Sumber energi dari biomassa di Indonesia sangat potensial sebagai sumber energi alternatif. Menurut Demirbas (2009), biomassa termasuk kayu dan residu penebangan, tanaman pertanian dan produk sampingan limbahnya, bagian organik dari limbah padat kota, kotoran hewan, biosolid kota (limbah), limbah dari pengolahan makanan, dan tanaman air dan alga. Sektor kehutanan, perkebunan dan pertanian di Indonesia sangat banyak, dalam bentuk bahan mentah maupun limbah, sebagai sumber energi biomassa. (Arhamsyah, 2010; Wulandari, 2021).

Bambu merupakan salah satu biomassa yang sangat potensial sebagai sumber energi alternatif (Aisman, 2016). Selain itu, sebagai salah satu hasil hutan bukan kayu yang berkembang dengan sistem agroforestry, tanaman bambu mempunyai nilai ekonomi penting dan mendukung kehidupan masyarakat sekitar hutan baik langsung maupun tidak langsung (Wulandari et al., 2014). Sekitar 37 juta hektar bambu tersebar di seluruh iklim tropis dan sedang, dan 65% dari distribusi bambu terkonsentrasi di Asia (Lobovikov et al., 2007). Hutan bambu di Indonesia 5% dari total luas hutan bambu di Asia atau sekitar 2.000.000 ha dimana 67% atau sekitar 1.400.000 ha dari kawasan hutan bambu adalah di dalam

areal penggunaan lain (APL) sedangkan 37% atau sekitar 723.000 ha berada di kawasan hutan negara (Priyanto and Abdulah, 2014). Bambu termasuk ke dalam tanaman biomassa dapat berproduksi samapai 30 ton per ha karena tidak banyak membutuhkan ruang untuk tumbuh (Handoko et al., 2015). Hal ini dikarenakan bambu hanya membutuhkan 40-50 hari untuk tumbuh hingga diameter maksimum dan memiliki bentuk luar. Setelah disemai, tinggi bambu berumur 3-4 tahun mencapai 20 m, dan bambu berumur 5 tahun menjadi musim panen yang optimal (Tripathi and Singh, 1994).

Menurut Sutardi, S.R et al., (2015), sebagai bahan berlignoselulosa bambu dapat digunakan sebagai substitusi kayu yaitu untuk furnitur, pengemasan, bahan baku kerajinan (industri kecil) dan sarana pertanian. Bambu juga telah digunakan sebagai bahan baku industri kertas dan kayu lapis setelah diproses secara sekunder. Widjaja (2011) menyatakan bahwa terdapat kurang lebih 122 spesies bambu asli Indonesia dan 38 spesies bambu introduksi. Di antara 160 spesies tersebut, 84 spesies merupakan endemik, sedangkan 76 spesies lainnya dimanfaatkan oleh masyarakat lokal untuk kebutuhan harian, seperti kerajinan (27 spesies), sayuran (7 spesies), dan 42 spesies untuk keperluan lain. Industri kerajinan berbasis bambu akan menghasilkan limbah padat berupa serpihan, sayatan, potongan dan serbuk gergaji yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar.

Alamsyah et al (2017) menyatakan bahwa kekurangan biomassa sebagai bahan bakar padat jika digunakan secara langsung salah satunya adalah tidak ekonomisnya dalam transportasi jarak jauh sebab mempunyai ukuran dan bentuk yang bervariasi. Selain itu, biomassa juga memiliki nilai kalor yang relatif rendah, kadar karbon tetap (*fixed carbon*) rendah, kadar air tinggi, kadar bahan volatil tinggi, kerapatan curah rendah (*low bulk density*), kemudahan menyerap air (higroskopis), dan efisiensi pembakaran rendah (Chen et al., 2015; Nhuchhen et al., 2014).

Konversi biomassa menjadi sumber bionergi, bahan bakar padat, untuk meningkatkan kerapatan dan memudahkan pengangkutan serta penyimpanan karena memiliki ukuran dan kualitas yang seragam dapat melalui proses densifikasi. Salah satu hasil densifikasi biomassa selain briket adalah biopellet.

Biopellet merupakan hasil dari penghancuran dan pemadatan biomassa sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar yang berbentuk silinder (Syamsiro, 2016).

Torefaksi, sebagai suatu proses, dapat meningkatkan nilai kalor dari biomassa yang akan digunakan sebagai bahan bakar (van der Stelt et al., 2011). Proses torefaksi merupakan proses yang melibatkan perlakuan termal biomassa pada suhu sekitar 200-300 °C dalam kondisi hampir tanpa oksigen dengan laju pemanasan yang rendah atau waktu tinggal yang lama sekitar 30 menit - 2 jam (Tumuluru et al., 2011). (Alamsyah et al., (2017) dan Tumuluru et al., (2011b) juga menyatakan bahwa selain untuk meningkatkan nilai kalor, torefaksi dapat meminimalisir energi penggilingan, mencegah dekomposisi bahan bakar oleh jamur dan mikroba pada waktu penyimpanan di gudang dan pengangkutan serta bahan bakar lebih bersifat hidrofobik.

Kajian tentang pellet dari biomassa kayu dan limbah pertanian sudah banyak dilakukan (Haryanto et al., 2021; Rubiyanti et al., 2019; Sulistio et al., 2020), sedangkan kajian ilmiah tentang torefaksi pellet dari biomassa bambu serta karakteristik produknya masih terbatas (Liu et al., 2014). Penelitian ini diperlukan untuk mengetahui pengaruh torefaksi terhadap sifat fisik dan bioenergi dari pellet bambu.

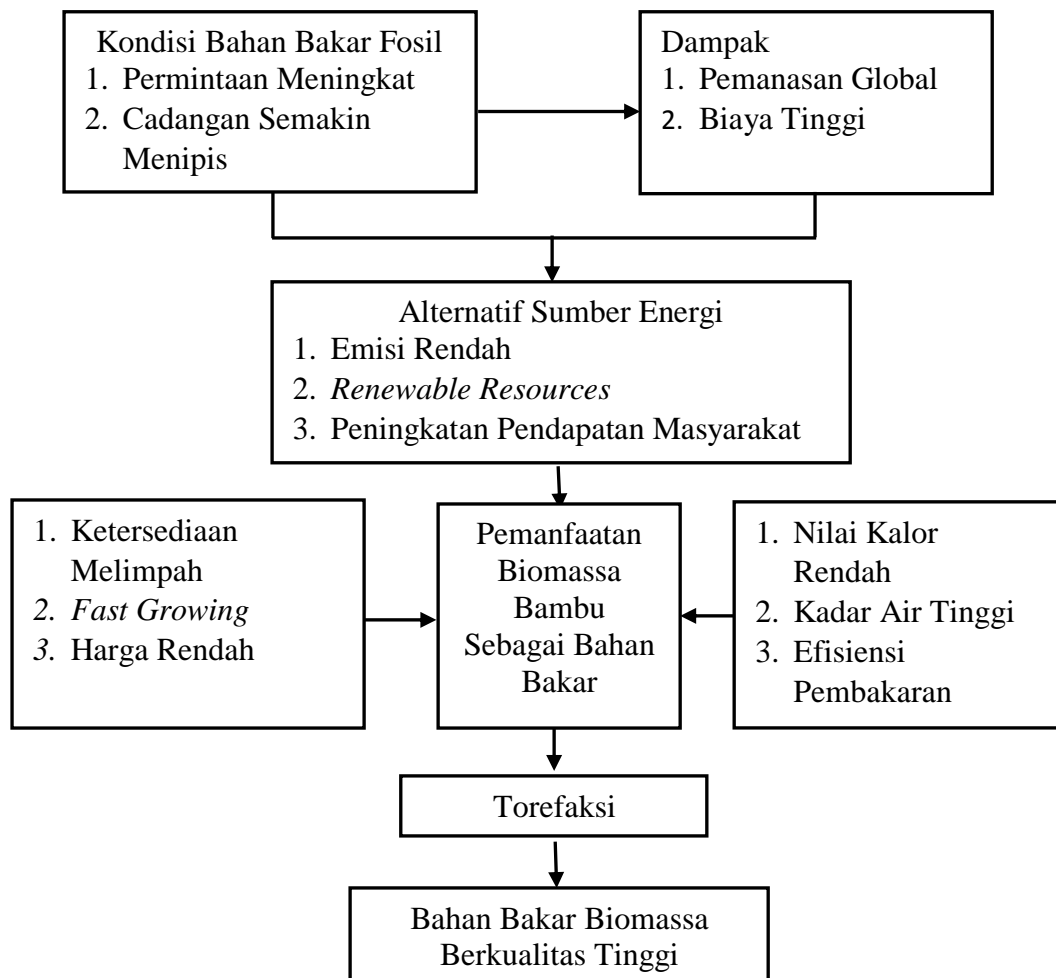
1.2 Tujuan Penelitian

1. Mengkaji sifat-sifat fisik dan bioenergi pellet dari 2 (dua) jenis bambu.
2. Menganalisis pengaruh torefaksi terhadap sifat fisik pellet bambu.
3. Menganalisis pengaruh torefaksi terhadap sifat bioenergi pellet bambu.

1.3 Kerangka Pemikiran

Ekonomi Indonesia yang berkembang dan terus berlanjut di berbagai sektor kehidupan berbanding lurus dengan meningkatnya pemanfaatan atau kebutuhan energi untuk keperluan pribadi dan industri. Hidayat et al (2020) dan Praptiningsih dan Nuriana (2014) menyatakan bahwa ketersediaan dan keberlanjutan energi sangat penting karena sudah merupakan kebutuhan pokok manusia selain pangan sehingga saat ini sangat krusial untuk mencari dan memanfaatkan sumber energi terbarukan.

Keunggulan bambu sebagai sumber energi adalah sifatnya yang terbarukan, namun bambu sebagai sumber energi dari biomassa memiliki kekurangan karena ketidakseragaman bentuk sehingga tidak ekonomis pada saat penyimpanan dan pengangkutan (Wahono et al., 2021). Biomassa perlu diproses melalui densifikasi menjadi biopelet adalah salah satu cara untuk memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi.



Gambar 1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran Penelitian

Biopelet masih mempunyai sifat hidrofobisitas yang rendah, rendahnya kepadatan energi, kadar air tinggi dan nilai kalor yang rendah sehingga memerlukan perlakuan tambahan untuk meminimalisir hal-hal tersebut di atas. yaitu dengan proses torefaksi. Torefaksi adalah pirolisis parsial biomassa yang dilakukan di bawah tekanan atmosfer dalam kisaran suhu sempit 200-300 °C, dan di bawah lingkungan yang lembam yang akan meningkatkan *grindability*, nilai

kalor, kadar air menurun, dan memperbaiki hidrofobisitas bahan (Nhuchhen et al., 2014; Syamsiro, 2016).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa

Semua jenis material organik yang dihasilkan dari fotosintesis dapat diartikan sebagai biomassa (Suhartoyo and Sriyanto, 2017). Demirbas (2009) menyatakan bahwa biomassa termasuk residu kayu dan penebangan, tanaman pertanian dan produk sampingan limbahnya, bagian organik dari limbah padat kota, limbah hewan, limbah dari pengolahan makanan, dan tanaman air dan ganggang. Pratama and Helwani (2017) juga menjelaskan bahwa biomassa adalah sumber energi global terbarukan dan lebih ekonomis sebagai sumber energi di negara-negara dunia ketiga.

Biomassa terbentuk dari interaksi karbon dioksida (CO_2), udara, air, tanah, dan sinar matahari dengan tumbuhan dan hewan. Setelah jangka waktu tertentu, mereka akan mati dan/atau terurai, mikroorganisme yang akan bereperan penting yang membentuk biomassa bersama bagian-bagian penyusunnya seperti H_2O , CO_2 , dan lain-lain. Biomassa juga bisa mengalami konversi termokimia, yang juga akhirnya memecahnya menjadi konstituen di atas (Basu, 2013).

Biomassa sendiri dikategorikan ke dalam beberapa jenis berupa biomassa tanaman energi, kayu dan limbahnya, limbah hasil dari sector pertanian (Torén et al., 2011). Menurut Syamsiro (2016), biomassa dianggap menjadi salah satu energi terbarukan yang berpotensi karena mempunyai tiga kandungan polimer yaitu lignin, selulosa dan hemiselulosa.

2.2. Potensi Biomassa

Kebutuhan akan energi saat ini semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dan juga perkembangan jaman. Biomassa dan limbah biomassa dapat dimanfaatkan menjadi produk bernilai tambah, salah

satunya melalui pemanfaatan sebagai bahan bakar atau energi terbarukan. Menurut (Haryana, 2018), penggunaan biomassa sebagai bahan bakar atau energi terbarukan dapat membantu mengurangi penggunaan fosil sebagai bahan bakar yang semakin berkurang dan efek GRK (gas rumah kaca) di bumi.

Potensi biomassa di Indonesia dapat mencapai 49.810 MW. Potensi tersebut didasarkan pada kadar energi yang dihasilkan dari limbah kehutanan, pertanian, perkebunan dan sampah organik perkotaan yang mencapai sekitar 200 juta ton biomassa. Jumlah potensi tersebut dianggap sangat besar dan tidak sebanding dengan jumlah yang digunakan yaitu sebesar 302,40 MW atau 0,64 % saja yang dapat digunakan. Oleh karena itu, perlu dimaksimalkan potensi biomassa tersebut agar juga dapat menjadi bahan substitusi dari fosil sebagai bahan bakar yang selama ini menjadi sumber utama energi di Indonesia.

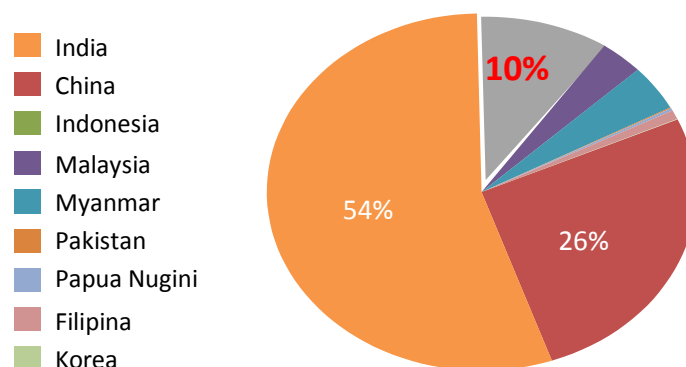
Indonesia terletak di zona tropis dan memiliki kapasitas untuk menghasilkan biomassa dalam jumlah besar sepanjang tahun, di mana biomassa kayu dari hutan merupakan sumber energi yang sangat berharga dalam bentuk bahan bakar domestik bagi penduduk setempat. Selain itu, Indonesia memiliki banyak residu pertanian untuk sumber energi biomassa, karena ekonomi berbasis pertanian mereka.

Beberapa penelitian terdahulu juga menjelaskan bahwa biomassa sangat berpotensi digunakan sebagai bahan energi terbarukan. Riyanti (2009) menjelaskan bahwa beberapa jenis biomassa sangat berpotensi dijadikan sebagai bioetanol. (Papilo, 2015) melaporkan bahwa biomassa dari hasil pertanian dan perkebunan berpotensi besar sebagai sumber pembangkit tenaga listrik, dengan total energi teoritis biomassa yang dapat dihasilkan adalah sebesar 77.466.754,8 gj/tahun. (Pranoto et al., 2013) juga melaporkan bahwa hasil limbah hutan produksi memiliki nilai potensi biomassa sebesar 24,69%.

Penjelasan beberapa penelitian diatas tersebut menjadi alasan yang kuat bahwa biomassa sangat berpotensi. Salah satunya yaitu dengan konversi biomassa sisa pertanian atau hutan sebagai bahan energi terbarukan melalui pembakaran parsial, torefaksi, atau pirolisis (Basu 2013).

2.3 Potensi Bambu sebagai Biomassa di Indonesia

Dalam taksonomi, bambu termasuk ke dalam famili Poaceae (famili rumput), sub famili Bambusoideae yang berisi 1250 spesies. Meskipun rumput, mereka masih memiliki "batang kayu" atau culm yang bisa mencapai ketinggian 15-20 m atau bahkan 40 m dengan spesies terbesar yang diketahui (*Dendrocalamus giganteus*). Bambu dianggap sebagai tanaman yang paling cepat berkembang dengan kecepatan tumbuh tercatat 91 cm per hari. Fitur fisiologis lain dari bambu adalah bahwa sebagian besar spesies berbunga sangat jarang, dengan interval selama 60 sampai 120 tahun. Biasanya, semua tanaman dalam populasi akan berbunga pada saat yang sama dan setelah itu tanaman akan mati. Fenomenal ini, yang disebut "berbunga massal", telah membatasi komersialisasi banyak spesies. Sebagai konsekuensi dari jarang berbunga, pembibitan tanaman bambu biasanya dari bahan vegetatif daripada dari bahan generatif.



Gambar 2. Sumber daya Bambu di Indonesia dan Beberapa Negara di Asia

Bambu biasanya tumbuh di lingkungan yang hangat dan lembab (suhu tahunan rata-rata 15-20°C dan precipiasi tahunan 1000-1500mm) (Scurlock et al., 2000). Hutan bambu alami dan ditanam dapat ditemukan di 3 benua termasuk Asia, Afrika dan Amerika Selatan. Hutan bambu mencakup lebih dari 36 juta hektar di seluruh dunia. Ini paling melimpah di daerah monsun Asia Timur, terutama di India dan Cina dengan masing-masing 11.400.000 juta hektar dan 5.400.000 juta hektar. Selama 15 tahun terakhir, area bambu di Asia telah meningkat sebesar 10 persen, terutama karena penanaman bambu skala besar di

Cina dan India (Lobovikov et al., 2007). Inventarisasi sumber daya bambu di Indonesia dan negara-negara di Asia disajikan dalam Gambar 2.

Bambu merupakan salah satu tanaman yang mudah didapatkan di Indonesia. Badan Pusat Statistik (2020) menjelaskan bahwa bambu merupakan jenis hasil hutan bukan kayu (HHBK) yang cukup potensial untuk dapat dikembangkan dilihat dari wilayah penyebarannya di seluruh Indonesia dari tahun 2014 sampai saat ini sebesar $\pm 12,060$ juta batang. Di Indonesia, bambu menempati area seluas 2 juta hektar, yang merupakan 5% dari populasi bambu dunia, terdiri dari 33 genus dan 160 spesies. Hal ini dikarenakan bambu hanya membutuhkan 40-50 hari untuk tumbuh hingga diameter maksimum dan memiliki bentuk luar. Setelah disemai, tinggi bambu berumur 3-4 tahun mencapai 20 m, dan bambu berumur 5 tahun menjadi musim panen yang optimal (Tripathi and Singh, 1994). Bambu juga hanya membutuhkan ruang tumbuh yang tidak banyak sehingga tergolong ke dalam tanaman biomassa yang dapat memproduksi 20-30 ton per hektarnya (Handoko et al., 2015). Potensi bambu sebagai biomassa yang cukup melimpah ini belum banyak dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan padahal pengembangan energi terbarukan yang berasal dari biomassa sangat prospektif.

Tabel 1. Karakteristik Bahan Bakar dan Nilai Kalor beberapa Jenis Bambu

Jenis Bambu	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Senyawa <i>volatile</i> (%)	Kadar Karbon Terikat (%)	Nilai Kalor (kJ/kg)
<i>Bambusa Deecheyama</i>	14.3	3.70	63.10	18.9	15.700
<i>Dendrocalamus asper</i>	5.8	2.70	71.70	19.8	17.585
<i>Phyllostachys nigra</i>	13.62	0.41	72.27	13.7	19.27
<i>Phylotachys bambosoides</i>	9.54	0.53	75.5	14.38	19.49
<i>Phyllostachys bissetii</i>	21.97	0.9	64.99	12.14	19.51
<i>Bambusa vulgaris</i>		2.7	76		19.050
<i>Bambusa strictus</i>		5.6	75		18.728
<i>Guadua angustifolia</i>		4.9	74		18.351

Sumber: (Akom et al., n.d.)

Bambu memiliki sejumlah karakteristik bahan bakar yang diinginkan seperti kandungan abu rendah dan indeks alkali. Nilai kalor bambu lebih tinggi daripada kebanyakan limbah pertanian (Scurlock et al., 2000). Kadar air dalam bambu relatif rendah (8 - 23%) dibandingkan dengan jenis tanaman lainnya. Karakteristik

bahan bakar dari beberapa jenis bambu ditunjukkan pada Tabel 1 dan perbandingan dengan beberapa sumber bahan baku biomassa ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Bioenergi Beberapa Sumber Biomassa

Tipe Biomassa	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Senyawa <i>Volatile</i> (%)	Kadar Karbon Terikat (%)	Nilai Kalor (kJ/kg)
Sekam Padi	12.05	1273	56.98	18.88	14.638
Jerami	10.12	1042	60.87	18.80	13.275
Ampas Tebu	50.76	175	41.99	5.86	9.664
Cangkang Sawit	12.12	366	68.31	16.30	18.446
Tongkol Jagung	40.11	95	45.55	13.68	11.198
Batang Jagung	41.69	380	46.98	8.14	11.634
<i>Bambusa Deecheyama</i>	14.30	370	63.10	18.90	15.700
<i>Dendrocalamus asper</i>	5.80	270	71.70	19.80	17.585

Sumber: (Sritong et al., 2012)

Fatriasari and Hermiati (2008) menjelaskan bahwa kandungan kimia bambu mempunyai unsur karbon penting diantaranya yaitu holoselulosa 73,32-83,8%, lignin 30,01-36,88%, abu 1,89-4,63% dan SiO₂, 01-3,51%. Bambu setelah proses pemanasan dengan berbagai perlakuan suhu setelah dianalisis proksimat dan ultimat terbukti terjadi peningkatan kualitas bambu sebagai sumber energi. Pada suhu sekitar 200-300°C kadar senyawa *volatile* pada bambu yang dipanaskan dapat berkurang dan terjadi peningkatan persentase kandungan karbon dan hidrogen serta menurunkan kadar oksigen sehingga menghasilkan penurunan rasio O/C yang memiliki peranan penting pada peningkatan nilai bakar biomassa (Azhar dan Rustamaji, 2009). Kemudian juga, Iskandar and Poerwanto (2015) menjelaskan bahwa unsur C (karbon) dan H (hydrogen) yang terkandung dalam biomassa bambu termasuk ke dalam zat yang reaktif, relatif mudah terbakar, dan dapat menghasilkan energi dalam bentuk panas ketika bereaksi dengan oksigen.

Bambu berbagai banyak karakteristik bahan bakar yang diinginkan dengan bahan baku bioenergi tertentu lainnya. Nilai pemanasannya bisa lebih tinggi daripada banyak bahan baku biomassa berkayu dan sebagian besar residu pertanian dan rumput (Sritong et al., 2012).

Bambu sebagai biomassa mempunyai nilai bakar dan kerapatan potensi energi (banyaknya potensi energi per satu satuan volume biomassa) yang tinggi (Azhar dan Rustamaji, 2012). Berdasarkan beberapa penjelasan tersebut bambu sebagai biomassa sangat berpotensi digunakan sebagai energi alternatif bahan bakar padat dan agar bambu dapat dimanfaatkan sebagai energi baru dan terbarukan maka perlu adanya proses konversi bentuk bambu menjadi bentuk lain melalui beberapa proses yang sesuai.

2.4 Klasifikasi dan Sifat Kimia Bambu

2.4.1 Bambu Andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*)

Bambu andong memiliki batang yang berwarna hijau dengan garis-garis vertikal putih saat masih basah dan menjadi kuning krem atau kekuningan setelah proses pengeringan. Bambu andong ini saat masih basah ataupun sudah kering memiliki bobot yang cukup berat.

Tabel 3. Sifat Kimia Bambu Andong

No.	Sifat Kimia	Kandungan (%)
1	Lignin	31,42
2	Holoselulosa	63,32
3	Alphaselulosa	42,32
4	Hemiselulosa	21,00
5	Kelarutan dalam air panas	5,14
6	Kadar air	9,61
7	Kadar abu	2,94
8	Kadar Silika	1,55

Sumber: Sutardi et al, 2015.

Klasifikasi bambu andong dapat dilihat sebagai berikut :

Kingdom : Plantae

Divisi : Spermatophyta

Kelas : Monokotiledon

Ordo : Poales

Famili : Poaceae

Genus : *Gigantochloa*

Jenis : *Gigantochloa pseudoarundinacea*

2.4.2 Bambu betung (*Dendrocalamus asper*)

Tabel 4. Sifat Kimia Bambu Betung

No.	Sifat Kimia	Kandungan (%)
1	Lignin	32,35
2	Holoselulosa	63,32
3	Alphaselulosa	42,32
4	Hemiselulosa	21,00
5	Kelarutan dalam air dingin	2,15
6	Kelarutan dalam air panas	3,91
7	Kadar air	10,89
8	Silica	0,38

Sumber: Sutardi et al., 2015)

Batang bambu betung memiliki permukaan yang berwarna hijau dengan buku di bagian pangkal sering memiliki akar pendek yang menggerombol. Bagian batang memiliki cabang. Cabang primer terdapat di bagian pangkal, lebih besar dari cabang yang lain dan sering dominan. Cabang yang bercabang lagi hanya terdapat di buku-buku bagian atas. Klasifikasi bambu betung dapat dilihat sebagai berikut :

Kingdom : Plantae
 Divisi : Magnoliophyta
 Kelas : Liliopsida
 Ordo : Poales
 Famili : Poaceae
 Genus : *Dendrocalamus*
 Jenis : *Dendrocalamus asper*

Tabel 2 memperlihatkan sifat-sifat kimia dari bambu betung.

2.5 Kekurangan Bahan Bakar Biomassa

Terlepas dari semua kelebihanannya, biomassa memiliki beberapa kekurangan yang sering menimbulkan kesulitan dalam penggunaan skala luas sebagai sumber energi. Dibandingkan dengan bahan bakar lain seperti batubara, biomassa memiliki kandungan oksigen yang lebih tinggi, nilai kalor yang lebih rendah,

densitas curah yang lebih rendah, sifat higroskopis yang lebih tinggi, dan kadar air yang lebih tinggi (Chen et al., 2021, Nhuchhen et al., 2014, Tumuluru et al., 2011, Alamsyah et al., 2017). Jadi, biomassa menghadapi beberapa tantangan teknis dalam sistem konversi energi (van der Stelt et al., 2011). Berat jenis biomassa mentah yang rendah menyebabkan masalah penyimpanan dan penanganan. Ini juga mengurangi kepadatan energi biomassa yang pada gilirannya meningkatkan volume umpan biomassa ke dalam sistem konversi untuk menghasilkan sejumlah daya tertentu.

Kepadatan biomassa yang rendah juga meningkatkan biaya yang terkait dengan penyimpanan, transportasi, dan penanganan material di pabrik (Singh et al., 2018; Tumuluru et al., 2011b). Kandungan oksigen yang lebih tinggi mengurangi nilai kalor dan dengan demikian menjadikannya bahan bakar bermutu rendah. Kandungan oksigen yang lebih tinggi bertanggung jawab untuk memproduksi volume gas buang selama pembakaran (van der Stelt et al., 2011) yang membutuhkan ukuran pabrik dan peralatan bantu yang jauh lebih besar.

Kadar air yang lebih tinggi (45-60%) dari biomassa mentah memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap produksi bioenergi dan rantai konsumsi (Ratte et al., 2011). Meskipun, kelembaban menambahkan beberapa manfaat dalam metode konversi biologis, hal ini tetap menjadi salah satu hambatan utama untuk konversi termokimia. Namun, sejumlah kecil kelembaban menunjukkan beberapa manfaat dalam proses gasifikasi di mana uap yang dihasilkan dari uap air membantu meningkatkan konsentrasi hidrogen dalam gas produser (Acharjee et al., 2011). Pada saat yang sama, kelembaban yang lebih tinggi juga menurunkan suhu gasifikasi secara keseluruhan, menghasilkan efisiensi gasifikasi yang lebih rendah dan pembentukan tar yang lebih tinggi. Biomassa lembab di sisi lain juga menunjukkan kecenderungan yang lebih besar untuk mengalami dekomposisi alami. Ini mengubah fisik, kimia, dan sifat mikrobiologis dan menurunkan kualitas bahan bakar (Tumuluru et al., 2011). Biomassa basah, ketika disimpan bisa kehilangan beberapa massa padat karena proses pembusukan mikroba.

Sifat higroskopis adalah kelemahan utama biomassa. Meskipun biomassa dapat dikeringkan sebelum digunakan, sifat higroskopis membuatnya menyerap

kembali kelembaban dari atmosfer sekitarnya bahkan jika disimpan di dalam ruangan. Sifat biomassa yang berserat meningkatkan kesulitan dalam menghancurkannya menjadi bubuk halus seperti yang diperlukan untuk pembakaran bersama dalam boiler berbahan bakar batubara yang dihancurkan. Ini menghasilkan biaya penggilingan yang lebih tinggi, atau mengurangi kapasitas pembangkitan pabrik. Sifat berserat biomassa tidak hanya meningkatkan biaya penggilingan, tetapi juga bertanggung jawab atas inkonsistensi dalam ukuran partikel (Tumuluru et al, 2011).

2.6 Densifikasi

Aplikasi biomassa sebagai sebagai bahan bakar memiliki berbagai kekurangan seperti kadar air yang tinggi dan ukuran yang tidak merata yang membuat sulit pada proses penyimpanan, pengumpulan dan pengangkutan. Salah satu perlakuan awal yang dapat dilakukan adalah proses pengurangan kadar air dan pengecilan ukuran agar didapatkan ukuran yang lebih seragam. Biomassa juga mempunyai beberapa kekurangan bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil karena densitas curah (*bulk density*) dan nilai kalorinya rendah, mempunyai kandungan air tinggi yang biasanya mencapai 50%, bersifat higroskopis sehingga sangat mudah menyerap air, mempunyai kandungan abu yang rendah namun memiliki kandungan logam alkali (Na, K) yang tinggi, efisiensi pembakarannya rendah dan mempunyai kandungan zat volatil yang tinggi (50-70%) sehingga menghasilkan asap yang banyak pada proses pembakaran (Chen et al., 2021; Tumuluru et al., 2011b). Oleh karena itu diperlukan teknologi atau metode lain untuk mengatasi masalah yang ada yaitu densifikasi.

Densifikasi biomassa dilakukan untuk memproses biomassa menjadi briket dan biopellet dengan tujuan untuk peningkatan densitas dan mengurangi dampak pada saat penyimpanan dan pengangkutan. Pratama and Helwani (2017) menyatakan bahwa kualitas bahan bakar padat dipengaruhi oleh densitas, nilai kalor bahan bakar akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya densitas. Penelitian Lehtikangas (2001) pengecilan ukuran mampu menurunkan biaya transportasi serta memudahkan penyimpanan dan penanganan.

2.6.1 Briket

Pembuatan briket merupakan salah satu proses densifikasi ortodoks yang digunakan untuk pembuatan bahan bakar padat. Ini melibatkan pencampuran partikel bahan baku dan penerapan tekanan yaitu proses memadatkan bahan yang mudah terbakar longgar yang homogen atau tidak homogen menjadi produk dengan kepadatan lebih tinggi untuk keperluan pembuatan bahan bakar. Biomassa dengan kepadatan curah rendah diubah menjadi briket bahan bakar dengan konsentrasi dan kepadatan energi tinggi melalui *brequetting*. Hal ini meningkatkan sifat fisiko-mekanik dan pembakaran. Proporsi optimal kisaran pengikat/perekat 5-25% direkomendasikan untuk menghasilkan briket berkualitas tinggi. Briket dapat dilakukan dengan atau tanpa aplikasi panas. Penerapan panas sebagian besar waktu meningkatkan kekuatan mekanik produk akhir.

Berdasarkan pemadatan, metode briket dapat dikategorikan menjadi tiga: tekanan tinggi, tekanan sedang (ditambah pemanasan), dan pemadatan tekanan rendah (dengan pengikat). Dalam semua metode briket ini, bahan baku padat adalah sumber daya awal, dan partikel bahan baku secara kasar dapat diidentifikasi dalam produk akhir.

2.6.2 Pelet

Pelletizing telah diadopsi sebagai pengelolaan limbah biomassa dan teknik pengolahan dan produksi bahan bakar padat untuk beberapa aplikasi (Ibitoye et al., 2021). Produk *pelletizing* disebut sebagai pelet merupakan bahan bakar padat yang ditandai dengan curah tinggi dan kepadatan energi tinggi. Beberapa karakteristik logistik seperti penyimpanan, penanganan, dan transportasi menguntungkan menggunakan pelet. Pelet dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk kebutuhan rumah tangga, industri kecil dan menengah serta industri besar, bahkan juga bisa untuk pembangkit tenaga listrik. Konversi biomassa menjadi pelet sangat mengurangi pembentukan debu, mengurangi risiko residu pertanian dan efek negatif selama pemanfaatan, penanganan, dan operasi. Konversi biomassa menjadi pelet sangat mengurangi timbulan debu, mengurangi risiko agro-residu dan efek negatif selama pemanfaatan, penanganan, dan operasi. Dibandingkan dengan proses briket, perbedaan utama adalah *die*. *Pelletizing dies*

umumnya memiliki diameter yang lebih kecil dan mesin memiliki cetakan yang disusun sebagai lubang pada cincin cakram baja tebal. Rol *die* digunakan untuk menekan bahan baku ke dalam lubang. *Ring* dan *flat die* adalah dua jenis utama dari mesin pencetak pelet (Amirta, 2018; Malik et al., 2015).

Produksi pelet dengan sifat fisiko-mekanik yang baik sangat tergantung pada dua parameter penting: parameter proses dan bahan baku. Distribusi ukuran partikel, kadar air, dan distribusi bahan campuran yang homogen adalah parameter bahan baku yang penting. Parameter bahan baku secara signifikan mempengaruhi sifat-sifat pelet. Bahan baku dengan distribusi partikel yang dikemas rapat kemungkinan akan menghasilkan pelet dengan kepadatan tinggi. Produksi pelet pada kadar air optimal biasanya menghasilkan pelet dengan karakteristik yang baik. Padahal, kadar air optimal berbeda untuk semua bahan baku. Kadar air bahan baku secara dramatis mempengaruhi daya tahan pelet. Kadar air bahan baku secara dramatis mempengaruhi daya tahan pelet. Selain itu, distribusi ukuran partikel bahan baku secara signifikan mempengaruhi sifat fisiko-mekanik dari kepadatan curah, dan kepadatan pelet tunggal, kekuatan tekan, benturan dan ketahanan air, dan daya tahan air.

Produksi pelet dari biomassa seperti limbah pertanian membutuhkan pemahaman tentang mekanisme ikatan biomassa. Residu agro biasanya dipertahankan bersama dengan ikatan yang saling terkait. Dengan demikian, distribusi ukuran partikel yang tepat diperlukan untuk menutup lubang dan celah antara partikel selama produksi pelet. Mirip dengan proses briket, penambahan agen pengikat atau perekat dapat meningkatkan sifat ikatan dan kekuatan pelet biomassa. Untuk biomassa kayu, partikel dipertahankan bersama oleh jembatan padat melalui pelunakan lignin dan inter-difusi partikel yang berdekatan. Selanjutnya, pembentukan jembatan dapat terjadi dengan pengikat alami seperti protein, pati, dan lignin pada suhu proses dan kandungan air tertentu.

Ikatan hidrogen dan gaya Van der Waals juga signifikan dalam pembentukan pelet kayu. Sebagian besar waktu, biomassa kayu adalah bahan baku utama yang digunakan untuk menghasilkan pelet. Namun, ada area di mana kayu tidak tersedia atau tidak memadai untuk memenuhi permintaan pasar yang berlaku dari bahan bakar biomassa. Ini dominan dalam pertanian intensif, di mana

limbah pertanian tersedia dalam jumlah besar dan dengan biaya lebih rendah daripada kayu. Selain itu dari hasil hutan bukan kayu seperti bambu juga sangat potensial.

Tabel 5. Spesifikasi standar pelet biomassa

No	Parameter uji	Satuan, min/maks	Persyaratan	
			Rumah tangga	Industri
1	Densitas (kerapatan)	g/cm ³ , min	0,6	0,8
2	Kadar abu	%, maks	5	5
3	Kadar air	%, maks	10	12
4	Volatil matter	%, maks	75	80
5	Kadar Karbon tetap	%, min	14	14
6	Nilai kalor netto	MJ/kg, min	16,5	16,5

Sumber: [BSN], 2018

Pelet biomassa juga memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya investasi yang tinggi, rendahnya kerapatan curah, tingginya kadar air dan adsorpsi uap air pada pelet yang cukup mudah (Syamsiro, 2016). Bahan bakar dari pelet biomassa telah digunakan cukup lama oleh beberapa negara Asia juga Eropa sebagai sumber energi pada musim dingin untuk mesin pemanas ruangan. Standar mutu pelet biomassa di negara Indonesia yang telah ditentukan disajikan pada Tabel 3.

2.7. Torefaksi

Torefaksi merupakan suatu proses termokimia terbatas oksigen di mana pemanasan biomassa dilakukan secara pelan pada suhu yang sudah ditentukan dan untuk beberapa waktu tertentu dipertahankan sehingga terjadi degradasi pada kandungan hemiselulosa. Produk padat yang dihasilkan menjadi maksimal dari hasil massa dan energi (Basu, 2013). Proses torrefaksi berlangsung pada kisaran suhu 200-300 °C. Proses torefaksi meningkatkan kandungan karbon dan menurunkan kandungan volatil. Torefaksi merupakan suatu prinsip yang menggunakan proses gasifikasi untuk biomassa kayu sebagai bahan bakar ditemukan pertama kali tahun 1930. Torefaksi telah menerima perhatian kembali dalam beberapa tahun terakhir ini meskipun untuk rantai produksi energi saat ini

masih merupakan teknologi *pretreatment* untuk *upgrading* biomassa (Pratama and Helwani, 2017; Raut et al., 2016). Melalui torefaksi kandungan polimer biomassa berkurang, densitas energi biomassa meningkat dan torefaksi digunakan sebagai teknologi untuk meningkatkan kualitas biomassa dalam rantai pembangkit listrik menggunakan gas inert / aliran nitrogen untuk menghasilkan bahan bakar.

Dalam proses torefaksi, perubahan besar dan transformasi yang terjadi di dalam biomassa dapat diprediksi terutama dengan memahami perilaku tiga konstituen polimer (Nhuchhen et al., 2014). Sebagai contoh, hemiselulosa, komponen yang sangat reaktif, mengalami dekomposisi dan devolatilisasi, dan berkontribusi sebagian besar kehilangan massa dalam proses torrefaksi. Oleh karena itu, bahan biomassa dengan kandungan hemiselulosa yang tinggi memiliki hasil produk padat yang lebih rendah dibandingkan dengan biomassa dengan hemiselulosa yang rendah. Asam asetat dan metanol dari acetoxy- dan grup methoxy adalah konstituen utama dari gas volatil yang dilepaskan selama degradasi termal hemiselulosa. Meskipun, hanya sebagian kecil dari selulosa yang terdegradasi dalam kisaran suhu torefaksi (200-300 °C), uap air dan asam yang dilepaskan dari hemiselulosa juga dapat meningkatkan degradasi selulosa. Lignin yang memiliki lebih banyak karbon daripada dua konstituen polimer biomassa lainnya, secara termal lebih stabil dan mengambil bagian yang lebih besar dalam produk padat akhir. Produk padat dengan kandungan karbon yang lebih tinggi menghasilkan produk padat energi setelah torefaksi.

Torefaksi terdiri dari empat langkah sederhana seperti: a) Pengeringan, di mana hanya kadar air permukaan (bebas) yang dihilangkan, (b) Pasca - pengeringan, di mana kelembaban terikat serta beberapa hidrokarbon ringan dihilangkan, (c) Torefaksi - pemanasan isothermal - di mana panas yang disuplai membentuk depolimerisasi, devolatilisasi parsial, dan reaksi karbonisasi parsial (d) Proses pendinginan (hingga sama dengan suhu sekitar,). Waktu siklus keseluruhan dari proses torefaksi adalah jumlah waktu yang dibutuhkan selama proses pengeringan, pasca-pengeringan, torefaksi dan pendinginan.

Pengeringan adalah langkah utama dan penggunaan energi yang intensif dalam proses torefaksi. Proses pengeringan mengacu pada proses menghilangkan permukaan dan air yang terikat dari biomassa mentah. Pengeringan

diklasifikasikan sebagai proses non-berreaksi dan reaktif. Pengeringan biomassa dalam kisaran suhu 50-150 °C dikenal sebagai pengeringan non-reaktif, ketika itu terutama menghilangkan air permukaan, menghasilkan penyusutan dalam ukuran produk (Tumuluru et al., 2011). Pengeringan non-reaktif diikuti oleh pengeringan reaktif dalam kisaran suhu 150-200 °C di mana kerusakan hidrogen, dan ikatan karbon terjadi, memancarkan ekstraktif lipofilik. Fase ini ditandai dengan deformasi struktural permanen. Pengeringan reaktif secara substansial menghilangkan air yang terikat dari biomassa. Suhu tetap tidak berubah selama pengeringan, dan torefaksi dengan perbedaan penting bahwa energi yang digunakan selama pengeringan adalah yang tertinggi, dan bahwa selama torefaksi jauh lebih rendah. Torefaksi destruktif dimulai hanya di atas 200 °C, durasi torefaksi, yang dikenal sebagai waktu tinggal, biasanya diukur secepatnya ketika suhu biomassa melebihi suhu itu (Basu, 2013).

Devolatilisasi dapat didefinisikan sebagai proses menghilangkan kandungan biomassa oksigen dan volatil. Ini umumnya terjadi setelah suhu biomassa di atas 200 °C di mana *volatile* (baik gas maupun tar) mulai meninggalkan matriks padat biomassa. Hal ini juga dikenal sebagai proses pengeringan destruktif, yang ditandai dengan devolatilisasi dan karbonisasi hemiselulosa, depolimerisasi, devolatilisasi, dan pelunakan lignin, serta depolimerisasi dan devolatilisasi selulosa. Namun, dapat dicatat bahwa devolatilisasi jarang selesai selama torefaksi. Biomassa yang dibakar selalu mengandung beberapa hal yang mudah menguap tidak seperti arang yang dihasilkan dari proses pirolisis. Beberapa parameter proses yang mempengaruhi proses torefaksi, diantaranya yaitu waktu tinggal, suhu, *particle size*, jenis biomassa, dan kadar air (*moisture content*) (Tumuluru et al, 2011).

Beberapa keuntungan dari torefaksi biomassa (Haryanto et al., 2021; Niu et al., 2019; Tumuluru et al., 2011b) yaitu, 1) Kelembaban lebih rendah. Kadar air yang terbatas mempengaruhi reaksi pergeseran gas air dan selanjutnya meningkatkan kandungan hidrogen dalam syngas, yang bermanfaat bagi gasifikasi; 2) Kepadatan energi, kepadatan massa, dan nilai pemanasan yang lebih tinggi. Hal ini mengurangi volume biomassa dan dengan demikian memperpanjang jarak transportasi untuk digunakan atau pemrosesan lebih lanjut;

3) Hidrofobisitas yang baik. Dikaitkan dengan hilangnya gugus hidroksil selama torefaksi, biomassa yang ditorefaksi dapat disimpan di tempat terbuka untuk waktu yang lama, dengan rendahnya resiko lembab, dekomposisi dan pembusukan; 4) Peningkatan *grindability*. Bahan bakar lebih rapuh dan hilangnya struktur berserat mengakibatkan berkurangnya ukuran partikel biomassa yang ditorefaksi, yang juga mengurangi konsumsi energi untuk penggilingan ketika *co-firing* dengan batubara; 5) Mengurangi rasio O/C. Menghasilkan efisiensi gasifikasi dingin yang tinggi dan lebih sedikit asap dalam pembakaran 6) Mengurangi efek pada saat perubahan musim serta mengurangi biaya penyimpanan.

Torefaksi dapat meningkatkan biomassa ke bahan bakar yang lebih seragam yang memiliki pemanfaatan lebih lanjut dalam proses berikut: 1) Co-firing dengan batubara. Torefaksi dapat meningkatkan sifat bahan bakar dan mengubah perilaku pembakaran biomassa mentah, sehingga mempromosikan potensinya untuk digunakan sebagai bahan bakar di pabrik konversi termal yang ada, tingkat emisi SO₂, CO₂, NO_x yang lebih rendah dan pengurangan jelaga dalam kaitannya dengan proses torefaksi. Torefaksi adalah teknologi yang muncul yang memungkinkan tingkat *co-firing* biomassa yang lebih besar dengan batubara.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 4 (empat) bulan mulai dari bulan Juli 2020 sampai dengan Oktober 2020. Pembuatan pelet bambu dilakukan di Pusat Penelitian Biomaterial LIPI, Cibinong. Torefaksi dengan *electric furnace* serta pengujian sifat fisis dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Pengujian nilai kalor dilakukan di Laboratorium Balai Penelitian Ternak, Bogor.

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan yaitu bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dan bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinacea*) berumur empat tahun yang berasal dari Desa Cikeretek dari Ciawi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, Indonesia (koordinat 6°40'49,3" Lintang Selatan dan 106°49'49,6" Bujur Timur). berdiameter 10 – 15 cm dengan panjang masing-masing bambu 9 meter . Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *circular saw*, *hammer mill*, pisau/golok, *electric furnace*, timbangan analitik, desikator, *chromameter* CR-400 Konica Minolta Inc., Tokyo, Jepang serta *Pellet Mill* Model HM 560 A dari LIPI.

3.3 Persiapan Bahan

Produksi pelet bambu dilakukan di Pusat Penelitian Biomaterial, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Cibinong, Jawa Barat, Indonesia. Bambu andong dan betung digunakan untuk memproduksi pelet. Bambu andong dan betung sebanyak 50 batang untuk setiap bambu ditebang pada ruas keempat dari tanah dengan panjang rata-rata 9 m. Batang bambu kemudian dikeringkan di luar ruangan selama satu minggu lalu dipotong menggunakan *circular saw* menjadi 3

bagian yaitu pangkal, tengah, dan ujung dengan ukuran panjang masing-masing 3 m. Setiap potongan kemudian dibelah menjadi bilah berukuran kecil dan dibuang kulit bagian luar dan dalamnya dengan menggunakan mesin *planer*. Bilah bambu tanpa kulit dipotong menjadi serpihan kecil kemudian dimasukkan ke dalam *hammer mill* untuk menghasilkan partikel atau serbuk bambu. Serbuk kemudian dikeringkan hingga mencapai kadar air $\pm 12\%$, kemudian dimasukkan ke dalam mesin pelet dengan kapasitas pemrosesan 1 ton/jam (Model HM560A, Shandong HM Better Pellet Mill Machinery, China). Pelet bambu didinginkan kemudian dimasukkan ke dalam wadah plastik.



Gambar 3. Diagram alir proses pembuatan pelet bambu andong dan betung

3.4. Proses Torefaksi

Pelet bambu yang telah disiapkan diukur panjang dan diameternya serta ditimbang kemudian dibungkus menggunakan aluminium foil. Bagian bawah bungkus kemudian dilubangi dengan menggunakan jarum. Torefaksi pelet bambu dilakukan dengan menggunakan oven listrik pada suhu 280°C dengan waktu tinggal 40 menit. Setelah 40 menit, sampel dikeluarkan dari tungku kemudian dimasukkan ke dalam ruangan pada suhu $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban relatif (RH) 70-80%. Pelet bambu yang telah ditorefaksi ditimbang kemudian diukur panjang dan diameternya.

3.5 Pengujian Pelet Bambu Sebelum dan Sesudah Torefaksi

Pengujian yang dilakukan terhadap pelet bambu meliputi geometri, perubahan penampakan visual, kerapatan, kadar air, daya adsorpsi, nilai kalor, dan serta ketahanan air pelet bambu sebelum dan sesudah torrefaksi dievaluasi.

3.5.1 Perubahan Penampakan Visual

Dengan menggunakan system CIE-Lab, perubahan penampakan visual pelet diamati dengan mengevaluasi perubahan warna. Parameter warna penggunaan sistem CIE Lab yaitu L^* , a^* , b^* . Evaluasi warna akan dilakukan menggunakan sistem CIE-Lab (Esteves et al, 2008) dengan alat *chromameter* (CR-400, Konica Minolta Inc., Tokyo, Jepang). Parameter warna yang diukur meliputi kecerahan (L^*), kromatisitas merah-hijau (a^*), kromatisitas kuning-biru (b^*). Perubahan kecerahan atau (ΔL^*), kromatisasi merah/hijau (Δa^*), dan kromatisasi kuning/biru (Δb^*) dan perubahan warna secara keseluruhan (ΔE^*) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta L = L_a^* - L_b^*$$

$$\Delta a^* = a_a^* - a_b^*$$

$$\Delta b^* = b_a^* - b_b^*$$

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

dimana L_b^* , a_b^* , dan b_b^* , secara berturut-turut adalah kecerahan, kromatisasi merah/hijau, dan kromatisasi kuning/biru sebelum torefaksi dan L_a^* , a_a^* , dan b_a^* setelah torefaksi.

Derajat perubahan warna menurut Valverde dan Moya (2014) mengklasifikasikan perubahan warna dapat ditentukan dengan sebagai berikut:

$$0 < \Delta E^* \leq 0,5 \quad = \text{perubahan warna dapat (negligible)}$$

$$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5 \quad = \text{perubahan warna sedikit (slightly perceivable)}$$

$$1,5 < \Delta E^* \leq 3 \quad = \text{perubahan warna nyata (noticeable)}$$

$$3 < \Delta E^* \leq 6 \quad = \text{perubahan besar (appreciable)}$$

$$6 < \Delta E^* \leq 12 \quad = \text{perubahan sangat besar (very appreciable)}$$

3.5.2 Kerapatan

Kerapatan pelet tunggal (ρ_p) pelet dihitung sesuai dengan rumus sebagai berikut:

$$V_p = \pi/4d^2p \quad (1)$$

$$\rho_p = m_p/v_p \quad (2)$$

dimana, V_p adalah volume pelet tunggal (cm^3), d adalah diameter pelet tunggal (mm), p adalah panjang diameter pelet tunggal (mm), ρ_p adalah kerapatan pelet tunggal (g/cm^3) dan m_p adalah massa pelet tunggal (g).

Kerapatan pelet ruah (ρ_b dalam g/cm^3) dihitung sebagai rasio massa pelet (m_b dalam g) dan volume wadah (V_w dalam cm^3), menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\rho_b = m_b/v_w$$

Pelet ditempatkan di wadah, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital skala presisi. Volume wadah tersebut ditentukan dengan panjang, lebar dan tingginya.

3.5.4 Nilai Kalor

Pengukuran nilai kalor dilakukan di Laboratorium Balai Penelitian Tenak Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian di Ciawi – Bogor.

3.5.5 Kadar Air

Penentuan kadar air dilakukan mengacu pada standar SNI 8021 : 2014. Pelet sampel yang telah ditimbang kemudian dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam. Untuk mengetahui berat kering oven, pelet sampel ditimbang kembali setelah dioven. Nilai kadar air dinyatakan dalam persen. Besarnya kadar air dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{BA - BKO}{BKO} \times 100\%$$

dengan :

BA : Berat awal (g)

BKO : Berat kering setelah dioven (g)

3.5.6 Adsorpsi Uap Air

Pengujian daya adsorpsi pelet dilakukan dengan memasukkan sampel pelet ke dalam oven dengan suhu $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, dimasukkan ke dalam ruangan pada suhu $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban relatif (RH) 70-80%. Berat sampel kemudian ditimbang setiap hari selama 30 hari.

3.5.7 Ketahanan Terhadap Air

Pelet bambu sebelum dan sesudah torefaksi untuk mengetahui ketahanan pelet terhadap laju penyerapan air dilakukan dengan perendaman dengan rentang waktu yang berbeda yaitu 5 menit, 30 menit dan 1 jam.

3.5.8 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. KESIMPULAN

1. Torefaksi menggunakan *electric furnace* menyebabkan terjadinya perubahan warna secara visual yang semakin gelap pada pelet andong dan pelet betung.
2. Nilai kadar air pada pelet bambu andong dan betung control berturut-turut sebesar 6,81% dan 8,76% %, setelah torefaksi dengan *electric furnace* mengalami penurunan kadar air berturut-turut sebesar 4,10% dan 3,72%.
3. Nilai kerapatan pelet andong dan pelet betung kontrol setelah torefaksi berturut-turut sebesar 1,09 dan 1,11 g/cm³
4. Ketahanan terhadap air pelet dengan perlakuan *electric furnace* memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan dengan pelet kontrol.
5. Nilai kalor pelet andong dan pelet betung setelah torefaksi berturut-turut sebesar 19,85 dan 20,65 MJ/kg.
6. Biomassa bambu berpotensi sebagai bahan baku pelet dilihat dari nilai kadar air dan kerapatan serta nilai kalor pelet bambu andong dan betung memenuhi Standar Nasional Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharjee, T.C., Coronella, C.J., Vasquez, V.R., 2011. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 102, 4849–4854.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.018>
- Aisman, A., 2016. Study of the Potential Development of Biomass Based Electricity Bamboo. *J. Agroindustri* 6, 65–72.
<https://doi.org/10.31186/j.agroind.6.2.65-72>
- Akom, E., Acheampong, E., Kwaku, M., n.d. Bamboo Pellets for Sustainable Bioenergy Production in Ghana 24.
- Alamsyah, R., Siregar, N.C., Hasanah, F., 2017. Torrefaction study for energy upgrading on Indonesian biomass as low emission solid fuel. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 65, 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012051>
- Amirta, R., 2018. Pelet Kayu Energi Hijau Masa Depan. Mulawarman University Press. Samarinda.
- Arhamsyah, A., 2010. Pemanfaatan Biomassa Kayu Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *J. Ris. Ind. Has. Hutan* 2, 42.
<https://doi.org/10.24111/jrihh.v2i1.914>
- ASTM D 2015-00. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter.
- Basu, P., 2013. Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: practical design and theory, Second edition. ed. Academic Press is and imprint of Elsevier, Amsterdam ; Boston.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2017. Statistik Produksi Kehutanan.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2018. Pelet Biomassa Untuk Energi. SNI 8675:2018

- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2014. Standar Nasional Indonesia (SNI). Pelet kayu (SNI 8021-2014).
- Chen, W.-H., Lin, B.-J., Lin, Y.-Y., Chu, Y.-S., Ubando, A.T., Show, P.L., Ong, H.C., Chang, J.-S., Ho, S.-H., Culaba, A.B., Pétrissans, A., Pétrissans, M., 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Prog. Energy Combust. Sci.* 82, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chen, W.-H., Peng, J., Bi, X.T., 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Demirbas, A., 2009. Biofuels from Agricultural Biomass. *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 31, 1573–1582. <https://doi.org/10.1080/15567030802094011>
- Fatriasari, W., Hermiati, E., 2008. Analisis Morfologi Serat Dan Sifat Fisis-Kimia Pada Enam Jenis Bambu Sebagai Bahan Baku Pulp Dan Kertas 8.
- Handoko, E., Maurina, A., Prastyatama, B., Gustin, R., Sudira, B., Priscila, J., 2015. Peningkatan Durabilitas Bambu Sebagai Komponen Konstruksi Melalui Desain Bangunan Dan Preservasi Material. *Res. Rep. - Eng. Sci.* 2.
- Haryana, A., 2018. Biomass Utilization as Renewable Energy for Optimization of National Energy Mix. *Bappenas Work. Pap.* 1, 55–65. <https://doi.org/10.47266/bwp.v1i1.9>
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D.A., Triyono, S., Amrul, Wisnu, F.K., 2021. Torréfaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 749, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012047>
- Hidayat, W., Febrianto, F., Purusatama, B.D., Kim, N.H., 2018. Effects of Heat Treatment on the Color Change and Dimensional Stability of *Gmelina arborea* and *Melia azedarach* Woods. *E3S Web Conf.* 68, 03010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186803010>
- Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., Haryanto, A., 2020. Peningkatan Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit melalui Torefaksi Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *J. Rekayasa Proses* 14, 169–181. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.56817>
- Hilmawan, E., Fitriana, I., Sugiyono, A., Adiarso, A., 2021. BPPT - Outlook Energi Indonesia 2021.pdf.

- Ibitoye, S.E., Jen, T.-C., Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., 2021. Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. *Bioresour. Bioprocess.* 8, 75. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- Iskandar, T., Poerwanto, H., 2015. IDENTIFIKASI NILAI KALOR DAN WAKTU NYALA HASIL KOMBINASI UKURAN PARTIKEL DAN KUAT TEKAN PADA BIO-BRIKET DARI BAMBU 9, 5.
- Karlinasari, L., Yoresta, F.S., Priadi, T., 2018. Karakteristik Perubahan Warna dan Kekerasan Kayu Termodifikasi Panas pada Berbagai Suhu dan Jenis Kayu 16, 15.
- Kymäläinen, M., Rautkari, L., Hill, C.A.S., 2015. Sorption behaviour of torrefied wood and charcoal determined by dynamic vapour sorption. *J. Mater. Sci.* 50, 7673–7680. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9332-2>
- Larsson, S.H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I., Samuelsson, R., 2013. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Appl. Energy* 102, 827–832. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.046>
- Lehtikangas, P., 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass Bioenergy* 20, 351–360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
- Liu, Z., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z., Liu, X., 2014. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. *Wood Sci. Technol.* 48, 903–917. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0648-x>
- Lobovikov, M., Ball, L., Guardia, M., Russo, L. (Eds.), 2007. World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005, Non-wood forest products. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Malik, B., Pirzadah, T.B., Islam, S.T., Tahir, I., Kumar, M., Rehman, R. ul, 2015. Biomass Pellet Technology: A Green Approach for Sustainable Development, in: Hakeem, K.R., Jawaid, M., Y. Alothman, O. (Eds.), *Agricultural Biomass Based Potential Materials*. Springer International Publishing, Cham, pp. 403–433. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19
- Nhuchhen, D., Basu, P., Acharya, B., 2014. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *Int. J. Renew. Energy Biofuels* 1–56. <https://doi.org/10.5171/2014.506376>
- Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., Hui, S., 2019. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renew.*

- Sustain. Energy Rev. 115, 109395.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109395>
- Papilo, P., 2015. Penilaian Potensi Biomassa sebagai Alternatif Energi Kelistrikan. *J. Pasti* 9, 164–176.
- Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H., Jia, D., 2015. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Process. Technol.* 129, 168–173.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010>
- Pranoto, B., Pandin, M., Fithri, S.R., Nasution, S., Ketenagalistrikan, P., Kav, J.C.R., Lama, K., 2013. Peta Potensi Limbah Biomassa Pertanian Dan Kehutanan Sebagai Basis Data Pengembangan Energi Terbarukan 8.
- Pratama, Y., Helwani, Z., 2017. Pembuatan Briket Pelelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Pada Variasi Tekanan Dan Penambahan Perikat Tapioka 4, 6.
- Priyanto, P., Abdulah, L., 2014. PD-600-11-R1-I-Technical Report-Act-2.1.pdf.
- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U., 2020. Pengaruh Torefaksi terhadap Sifat Kimia Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit. *J. Tek. Pertan. Lampung J. Agric. Eng.* 9, 63.
<https://doi.org/10.23960/jtep-1.v9i1.63-70>
- Raut, M.K., Basu, P., Acharya, B., 2016. The Effect of Torrefaction Pre-Treatment on the Gasification of Biomass. *Int. J. Renew. Energy Biofuels* 1–14. <https://doi.org/10.5171/2016.823723>
- Riyanti, E.I., 2009. Biomassa Sebagai Bahan Baku Bioetanol 11.
- Rosyadi, I., Yusuf, Y., Aswata, A., Fadhil, M.A., Haryadi, H., 2019. Pengaruh Peningkatan Temperatur Terhadap Nilai Kalor, Proksimat dan Ultimat Pada Sampah Padat Kota (MSW). *FLYWHEEL J. Tek. Mesin Untirta* 120.
<https://doi.org/10.36055/fwl.v0i0.5843>
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Bakri, S., 2019. Characterization of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Pellets Torrefied with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor. *J. Sylva Lestari* 7, 321.
<https://doi.org/10.23960/jsl37321-331>
- Rudolfsson, M., Borén, E., Pommer, L., Nordin, A., Lestander, T.A., 2017. Combined effects of torrefaction and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass. *Appl. Energy* 191, 414–424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.035>
- Scurlock, J.M.O., Dayton, D.C., Hames, B., 2000. Bamboo: an overlooked biomass resource? *Biomass Bioenergy* 16.

- Singh, A.P., Agarwal, R.A., Agarwal, A.K., Dhar, A., Shukla, M.K. (Eds.), 2018. Prospects of Alternative Transportation Fuels, Energy, Environment, and Sustainability. Springer Singapore, Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6>
- Sritong, C., Kunavongkrit, A., Piumsombun, C., 2012. Bamboo: An Innovative Alternative Raw Material for Biomass Power Plants. *Int. J. Innov.* 3, 4.
- Strandberg, M., 2015. From torrefaction to gasification pilot scale studies for upgrading of biomass. Department of applied physics and electronics, Umea University, Umea.
- Suhartoyo, Sriyanto, 2017. Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Informatika, 2017: Kudus, 25 Juli 2017.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., 2020. Effects of Torefaction with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor and Electric Furnace on the Properties of Jabon (*Anthocephalus cadamba*) Pellets. *J. Sylva Lestari* 8, 65. <https://doi.org/10.23960/jsl1865-76>
- Sutardi, S.R., Nadjib, N, Muslich, M, Jasni, Sukastiningsih, I.M, Komaryati, S., Suprapti, S, Abdurrahman, Basri, E, 2015. Informasi sifat dasar dan kemungkinan penggunaan 10 jenis bambu.
- Syamsiro, M., 2016. Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Padat Biomassa Dengan Proses Densifikasi Dan Torrefaksi 1, 7.
- Telaumbanua, M., Febryan Kusuma, W., Haryanto, A., Suharyatun, S., Wahyudi, A., 2022. Effect of Torrefaction Temperature on Physical Properties of Biopellet from Variant Biomass Waste. *Int. J. Renew. Energy Res.*
<https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i1.12651.g8375>
- Torén, J., Dees, M., Vesterinen, P., Rettenmaier, N., Smeets, E., Vis, M., Wirsenius, S., Anttila, P., Böttcher, H., Ermert, J., Tuevo Paappanen, Verkerk, H., Unrau, A., 2011. Biomass energy Europe: Executive Summary, Evaluation and Recommendations.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2968.1443>
- Tripathi, S.K., Singh, K.P., 1994. Productivity and Nutrient Cycling in Recently Harvested and Mature Bamboo Savannas in the Dry Tropics. *J. Appl. Ecol.* 31, 109. <https://doi.org/10.2307/2404604>
- Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Hess, J.R., Kenney, K.L., 2011a. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 5, 683–707.
<https://doi.org/10.1002/bbb.324>

- Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Hess, J.R., Kenney, K.L., 2011b. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 5, 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
- van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasinski, K.J., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass Bioenergy* S0961953411003473. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Wahono, J., Sumarwan, U., Arifin, B., Purnomo, H., 2021. Renewable Energy Development Of Sustainable Bamboo Forest Based On Community Empowerment. *J. Apl. Bisnis Dan Manaj.* <https://doi.org/10.17358/jabm.7.1.188>
- Widjaja, E. The utilization of bamboo: At present and for the future. Dalam A. N. Gintings & N. Wijayanto (Eds.). 2011. *Proceedings of International Seminar Strategies and Challenges on Bamboo and Potential Non-Timber Forest Products (NTFP) Management and Utilization* (pp. 79-85)
- Wulandari, C., 2021. Identifying Climate Change Adaptation Efforts in the Batutege Forest Management Unit, Indonesia. *For. Soc.* 48–59. <https://doi.org/10.24259/fs.v5i1.7389>
- Wulandari, C., Budiono, P., Yuwono, S.B., Herwanti, S., 2014. Adoption of Agro-forestry Patterns and Crop Systems Around Register 19 Forest Park, Lampung Province, Indonesia. *J. Manaj. Hutan Trop. J. Trop. For. Manag.* 20, 86–93. <https://doi.org/10.7226/jtfm.20.2.86>
- Zen, M., Helwani, Z., 2019. Bahan Bakar Padat Dari Tandan Kosong Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Dengan Variasi Suhu Dan Waktu Torefaksi 6, 5.
- Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., 2020. Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Convers. Biorefinery.* <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00666-5>