

**PENGARUH SUHU DAN WAKTU TINGGAL PIROLISIS TERHADAP  
SIFAT ENERGI PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) DAN  
PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**AHMAD IZZUDDIN ARROFI  
2114151054**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

## **ABSTRAK**

### **PENGARUH SUHU DAN WAKTU TINGGAL PIROLISIS TERHADAP SIFAT ENERGI PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) DAN PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)**

**Oleh**

**AHMAD IZZUDDIN ARROFI**

Pada penelitian ini, pelet bambu betung dan kayu karet dipirolisis menggunakan variasi suhu 350°C, 400°C, dan 450°C dengan durasi 10, 20, dan 30 menit. Pelet biomassa hasil pirolisis dianalisis untuk mengetahui sifat fisis, nilai proksimat, dan nilai kalor. Pirolisis memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik pelet biomassa, seperti penurunan kerapatan yang signifikan setelah dipirolisis. Pelet biomassa hasil pirolisis juga mengalami penurunan kadar air yang meningkatkan kualitas pelet arang biomassa. Pelet arang biomassa hasil pirolisis memberikan peningkatan pada analisis proksimat dan nilai kalor. Pada uji ketahanan air, pelet pirolisis di tiap suhu tidak mengalami perubahan fisik setelah perendaman selama 24 jam. Perubahan warna ( $\Delta E^*$ ) pelet bambu betung dan kayu karet yang berubah total menjadi berwarna hitam pada tiap suhu.

Kata kunci: bioenergi, pelet biomassa, pirolisis, biochar.

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PYROLYSIS RESIDENCE TIME ON THE ENERGY PROPERTIES OF BAMBOO PELLETS (*Dendrocalamus asper*) AND RUBBER WOOD PELLETS (*Hevea brasiliensis*)**

**By**

**AHMAD IZZUDDIN ARROFI**

In this study, bamboo pellets and rubber wood pellets were pyrolyzed at temperatures of 350°C, 400°C, and 450°C for durations of 10, 20, and 30 minutes. The pyrolyzed biomass pellets were analyzed to determine their physical properties, proximate values, and calorific values. Pyrolysis significantly affected the characteristics of the biomass pellets, such as a significant decrease in density after pyrolysis. The pyrolyzed biomass pellets also experienced a decrease in moisture content, which improved the quality of the biomass charcoal pellets. The pyrolyzed biomass charcoal pellets showed improvements in proximate analysis and calorific value. In the water resistance test, pyrolysis pellets at each temperature did not undergo physical changes after soaking for 24 hours. Color changes ( $\Delta E^*$ ) in bamboo and rubber wood pellets turned completely black at each temperature.

Keywords: bioenergy, biomass pellets, pyrolysis, biochar.

**PENGARUH SUHU DAN WAKTU TINGGAL PIROLISIS TERHADAP  
SIFAT ENERGI PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) DAN  
PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)**

**Oleh**

**AHMAD IZZUDDIN ARROFI**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Kehutanan  
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

Judul Penelitian

: PENGARUH SUHU DAN WAKTU TINGGAL  
PIROLISIS TERHADAP SIFAT ENERGI  
PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus  
asper*) DAN PELET KAYU KARET (*Hevea  
brasiliensis*)

Nama

: Ahmad Izzuddin Arrofi

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2114151054

Jurusan

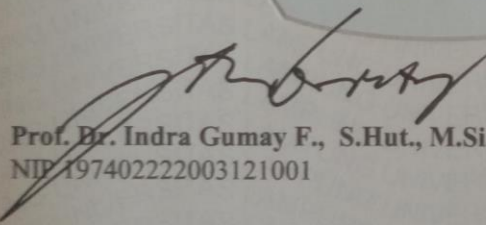
: Kehutanan

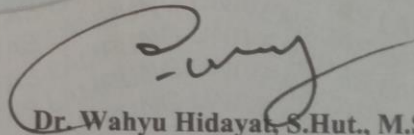
Fakultas

: Pertanian

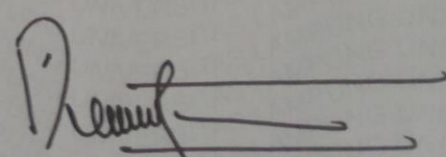


1. Komisi Pembimbing

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

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

2. Ketua Jurusan Kehutanan

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

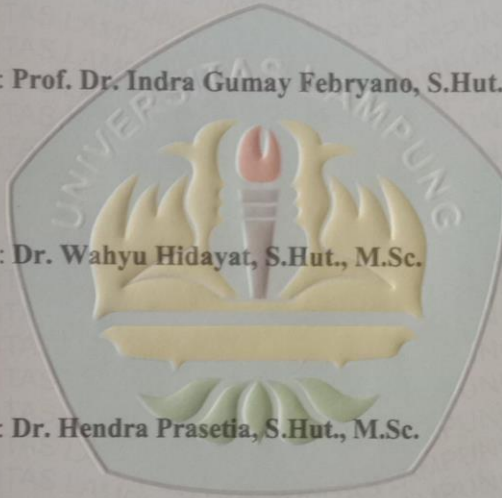
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 Juni 2025

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Izzuddin Arrofi

NPM : 2114151054

Jurusan : Kehutanan

Alamat Rumah : Kp. Bungur, Kelurahan Negeri Olok Gading, Kecamatan

Telukbetung Barat, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung

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

**“PENGARUH SUHU DAN WAKTU TINGGAL PIROLISIS TERHADAP SIFAT ENERGI PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) DAN PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*)”**

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

Bandar Lampung, 25 Juli 2025  
Yang membuat pernyataan

Ahmad Izzuddin  
NPM 2114151054







Penulis bernama Ahmad Izzuddin Arrofi, atau akrab dipanggil Izzuddin, lahir di Bandar Lampung, 28 Agustus 2003. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Samsul Qomar dan Ibu Siti Sunia. Riwayat pendidikan penulis yaitu Taman Kanak-kanak (TK) Qurrota A'yun pada tahun 2009-2010, Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Keteguhan

tahun 2010-2015, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Islam Terpadu Fitrah Inasani pada tahun 2015-2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Islam Terpadu Fitrah Inasani pada tahun 2018-2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Sarjana Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung, penulis aktif mengikuti organisasi, kepanitiaan, dan kegiatan sosial lainnya (*volunteer*). Penulis mengikuti seleksi mahasiswa prestasi tingkat jurusan dengan peringkat 1 dan fakultas dengan juara 5. Penulis juga mengikuti Birohmah Scholarship pada tahun 2022. Penulis aktif mengikuti organisasi tingkat jurusan, yaitu anggota Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (HIMASYLVA). Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Trirejo Mulyo, Kabupaten Tulang Bawang Barat selama 40 hari pada bulan Januari-Februari 2024. Penulis juga melaksanakan Praktik Umum Pengelolaan Hutan Lestari (PU-PHL) di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Getas di Blora, Jawa Tengah dan Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Wanagama I di Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang dikelola oleh Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada pada tahun 2024. Penulis mengikuti kegiatan magang Stasiun Penelitian Rawa Bunder (SPRB) Taman Nasional Way Kambas pada tahun 2023. Penulis mempublikasikan Prosiding Nasional dengan judul "*Pirolisis Pelet Biomassa Kayu Sebagai Teknologi Untuk Sumber Energi Alternatif Yang Berkelanjutan*" pada seminar nasional konservasi tahun 2025.



***“Allah Akan Meninggikan Orang-Orang Yang Beriman Di Antaramu Dan Orang-Orang Yang Diberi Ilmu Pengetahuan Beberapa Derajat. Dan Allah Maha Mengetahui Apa Yang Kamu Kerjakan”***

**(Q.S Al-Mujadalah (58) :11)**

***“Pohon Terkokoh Lahir dari Benih yang Kecil”***

**(Belerick)**

## SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga Penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul “**Pengaruh Suhu Dan Waktu Tinggal Pirolisis Terhadap Sifat Energi Pelet Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) Dan Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*)**” secara baik sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana kehutanan di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Skripsi ini tidak akan selesai tanpa bimbingan, bantuan baik moril maupun materil, dan arahan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, DEA., IPM., ASEAN Eng., selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM., selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama atas waktu dan kesabaran serta arahan, masukan, dukungan, dan saran kepada penulis selama proses penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas banyak waktu dalam memberikan ilmu, bimbingan, arahan, serta saran dan masukan selama penyusunan skripsi.
6. Bapak Dr. Hendra Prasetya, S.Hut., M.Sc., selaku Penguji atas waktu yang telah diluangkan, serta saran, masukan, arahan, dan dukungan selama penyusunan skripsi.
7. Bapak Ir. Indriyanto, M.P., selaku Dosen Pembimbing Akademik atas arahan, bimbingan, dan motivasi.
8. Segenap dosen Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas

Lampung yang telah memberikan ilmu serta wawasan yang luas selama proses perkuliahan, serta staf administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah banyak membantu penulis.

9. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian sangat membantu dalam kelancaran dan keberhasilan penelitian ini. Semoga kerja sama ini dapat terus berlanjut dan memberikan manfaat yang lebih besar.
10. Kedua orangtua, Abi dan Ummi atas segala pengorbanan, dukungan, do'a, kasih sayang, dan segala nasihat yang diberikan kepada penulis. Tanpa do'a dan dukungan Abi dan Ummi penulis tidak akan bisa berada di tahap ini. Terima kasih telah menjadi alasan penulis untuk menyelesaikan masa studi ini.
11. Kakak penulis Putri Hilal Maulani, S.Pd., dan kedua Adik penulis Muhammad Abbas Marzuki dan Uwais Syamil Makki yang selalu membantu penulis dalam segala hal, memberikan nasihat, dan dukungan.
12. Teman seperbimbingan Fania, Aji, Faiz, dan Anom yang telah membersamai, membantu, dan memotivasi selama pengambilan data skripsi.
13. Inggomeye Bima Pranandho, Hafizh Arliando Ibrahim Valian, Tegar Wirayuda, Muhammad Ikhlasul Amal, Fadil utama Wijaya, Heri Hasibuan, Latifah Khairunnisa, Naek Oktavianus Pakpahan, Nuril Atma Jaya, Oktavian Rizky, Roni Chandra dan Wahyu Hidayah, selaku teman dari gabungan player dingin x penghuni surga yang selalu memberikan dukungan dan semangat selama perkuliahan dan penyusunan skripsi.
14. Doni Harlan, yang memberikan *tips and trick* untuk menyelesaikan skripsi.
15. Rekan-rekan Angkatan 2021 'Laboriosa' yang telah memberikan dukungan serta semangat.
16. Seluruh pihak yang terlibat selama perkuliahan dan penulisan skripsi yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu.
17. Terakhir teruntuk diri sendiri, Ahmad Izzuddin Arrofi, mahasiswa yang menolak menyerah dan ingin terus belajar serta tumbuh walaupun sulit. Terima kasih sudah hadir dan menahan semua rasa malu, rasa takut, rrasa

khawatir dan tetap berani melangkah sejauh ini hingga menjadi manusia yang lebih baik. Semoga kelak bisa menjadi seseorang yang berhasil di jalan yang Allah Ridhoi dan yang dirimu pilih.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari katasempurna baik dari segi penyusunan, bahasa, maupun penulisannya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik beserta saran yang bersifat membangun dari semua pembaca agar penulis dapat lebih baik lagi di masa yang akan datang. Penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Bandar Lampung, 1 Agustus 2025

Ahmad Izzuddin Arrofi

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2 Tujuan.....	4
1.3 Kerangka Pemikiran .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Energi Terbarukan.....	6
2.2 Biomassa.....	7
2.3 Pelet Kayu.....	9
2.4 Bambu Betung ( <i>Dendrocalamus asper</i> ) .....	10
2.5 Pohon Karet ( <i>Hevea brasiliensis</i> ).....	11
2.6 Pirolisis .....	14
<b>III. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>16</b>
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian .....	16
3.2. Alat dan Bahan.....	16
3.3. Metode Pengambilan Data.....	16
3.4. Analisis Data.....	21
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>22</b>
3.1. Sifat Fisis .....	37
3.2 Analisis Proksimat .....	43
3.3 Nilai Kalor .....	46
<b>V. KESIMPULAN .....</b>	<b>46</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>48</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi warna .....	18
2 Perubahan warna pelet bambu betung .....	22
3. Perubahan warna pelet kayu karet .....	23
4. Kerapatan pelet biomassa .....	28
5. Uji daya tahan air pelet bambu betung.....	33
6. Uji daya tahan air pelet kayu karet .....	35
7. Analisis proksimat pelet biomassa.....	38
8. Nilai kalor pelet biomassa .....	44

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran. ....	5
2. Bambu betung ( <i>Dendrocalamus asper</i> ). ....	11
3. Pohon karet ( <i>Hevea brasiliensis</i> ). ....	14
4. <i>Muffle furnace</i> . ....	17
5. Perubahan $L^*$ pada pelet biomassa. ....	24
6. Perubahan $a^*$ pada pelet biomassa. ....	25
7. Perubahan $b^*$ pada pelet biomassa. ....	26
8. Perubahan $\Delta E^*$ pada pelet biomassa. ....	27
9. Adsorpsi uap air pelet bambu betung. ....	30
10. Adsorpsi uap air pelet kayu karet. ....	31



## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang dan Masalah

Kebutuhan dunia akan ketersediaan energi saat ini semakin meningkat dikarenakan populasi manusia yang terus meningkat, termasuk di Indonesia. Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat bahwa jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2020 mencapai hingga 270 juta jiwa yang menempatkan Indonesia menjadi negara keempat dengan penduduk paling banyak di dunia (Badan Pusat Statistik, 2020). Hal tersebut membuat Indonesia harus memiliki sumberdaya yang cukup untuk memenuhi kebutuhan masyarakatnya, salah satunya kebutuhan energi. Energi sangat diperlukan oleh manusia untuk melakukan kegiatannya sehari-hari, kebutuhan energi tersebut saat ini banyak dipenuhi oleh bahan bakar energi fosil (*fossil fuel*) sebagai sumber energi pokok masyarakat. Kebutuhan energi akan semakin meningkat setiap tahunnya. Hal ini berbanding lurus dengan peningkatan pertumbuhan ekonomi, laju pertumbuhan penduduk, dan pesatnya perkembangan sektor industri. Di sisi lain penggunaan *fossil fuel* memiliki dampak buruk bagi lingkungan (Syafitri *et al.*, 2022). Penggunaan yang semakin meningkat tiap tahunnya akan berdampak buruk bagi lingkungannya seperti menipisnya ketersediaan sumberdaya alam. Gas CO<sub>2</sub> yang merupakan hasil pembakaran energi fosil yang beracun bagi manusia yang juga memiliki efek yang berantai pada lingkungan seperti pemanasan global, hujan asam, naiknya permukaan laut karena cairnya kutub, rusaknya ekosistem dan dampak-dampak lain yang jika dibiarkan akan sangat merusak lingkungan (Harjanto, 2016).

Kebutuhan energi harus terpenuhi namun tetap memperhatikan dampak lingkungan dari hasil pemakaian energi tersebut. Sumber energi ramah lingkungan, bersifat dapat diperbarui dan mudah didapat perlu dihadirkan sebagai solusi dari

kebutuhan energi dan dampak buruk energi fosil. Biomassa merupakan istilah untuk semua bahan organik yang berasal dari tanaman (Papilo, 2015). Biomassa adalah satu-satunya sumber karbon terbarukan yang dapat dikonversi menjadi listrik, hal tersebut dikarenakan biomassa tersedia secara luas dan relatif lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Biomassa merupakan solusi dan bagian penting dari transformasi sumber energi untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat (Ridhuan *et al.*, 2019). Biomassa, sumber energi terbarukan yang menjanjikan, dapat mengurangi sekitar 10% emisi gas rumah kaca global (Wijaya *et al.*, 2025). Salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah bambu betung dan kayu karet.

Bambu merupakan salah satu substitusi kayu yang baik untuk dijadikan sumber energi. Bambu dapat dipanen hingga 30 ton per ha karena tidak membutuhkan banyak ruang untuk tumbuh dan berkembang dengan waktu 40-50 hari saja untuk mencapai diameter maksimum (Putri *et al.*, 2020). Sekitar 2.000.000 ha, atau 5% dari seluruh area hutan bambu di Asia, ditemukan di Indonesia (Priyanto *et al.*, 2014). Dari jumlah tersebut, 70% atau sekitar 1.400.000 ha ditemukan di Area Penggunaan Lain (APL), sementara 30% atau sekitar 600.000 ha ditemukan di kawasan hutan negara (Priyanto *et al.*, 2014). Selain bambu betung, terdapat limbah biomassa lain yang ada di Indonesia yang ketersediaannya melimpah seperti kayu karet.

Limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan biomassa yang baik untuk dijadikan sumber energi. Luas perkebunan karet di Indonesia seluas 3.229.861 ha menjadikan Indonesia sebagai negara dengan perkebunan karet terluas di dunia (Direktorat Jendral Perkebunan, 2017). Provinsi Lampung memiliki 158.999 ha lahan perkebunan karet, atau 4,9% dari seluruh lahan perkebunan karet di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2018). Pohon karet selama masa produktifnya menghasilkan produk utama berupa lateks. Namun pohon karet memiliki umur produktif untuk menghasilkan lateks selama 25 hingga 30 tahun (Widyasari *et al.*, 2015). Pohon karet setelah melewati umur produktifnya akan dilakukan peremajaan dan dapat menghasilkan kayu sebagai produk sampingan, itulah sebabnya mengapa banyak orang membudidayakannya (Admojo *et al.*, 2018).

Kedua biomassa tersebut potensial dijadikan sebagai bahan baku untuk sumber energi. Namun masih memiliki kekurangan seperti sifat higroskopis yang tinggi dan bentuk yang tidak seragam. Untuk mengatasi hal tersebut maka dilakukan pemadatan atau densifikasi menjadi pelet biomassa agar bentuk biomassa menjadi seragam dan akan memudahkan penyimpanan, distribusi dan efisiensi pemakaian biomassa sebagai sumber energi (Rustamaji, 2012). Sumber utama pelet biomassa adalah limbah kayu, seperti serbuk gergaji, serutan, dan serpihan kayu, yang merupakan sisa dari produksi mebel, kayu, dan hasil hutan lainnya yang memiliki ukuran dan bentuk yang beragam, oleh karena itu dilakukan densifikasi (Sidabutar, 2018). Salah satu metode yang menjanjikan untuk mengkonversi biomassa menjadi produk bioenergi adalah melalui proses pirolisis. Pirolisis adalah proses pemanasan bahan organik dalam lingkungan dengan oksigen terbatas atau tanpa oksigen, yang menghasilkan produk cair, padat (arang), dan gas (Asmunandar *et al.*, 2023). Zhang *et al.* (2017) mengatakan bahwa proses pirolisis dapat terjadi pada suhu 300°C-1000°C. Selama proses pirolisis berlangsung, suhu memiliki fungsi untuk menyediakan panas untuk memecah ikatan kimia pada biomassa.

Kebutuhan akan energi terbarukan yang semakin meningkat membuat teknologi pengolahan biomassa menjadi lebih penting. Perlakuan pirolisis pada pelet biomassa juga mendukung tercapainya *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin ke 7 (energi bersih dan terjangkau) yang mendorong penggunaan sumber energi yang berkelanjutan. Tidak hanya SDG 7, pemanfaatan pelet arang biomassa juga mendukung SDG poin ke 8 (pertumbuhan ekonomi dan pekerjaan layak) yang akan membuka peluang ekonomi di sektor energi terbarukan serta SDG poin 12 (konsumsi dan produksi berkelanjutan) melalui pengurangan limbah dan peningkatan efisiensi sumber daya.

Beberapa penelitian terkait pirolisis pada biomassa telah dilakukan. Ridhuan *et al.* (2019) melakukan perlakuan pirolisis dalam rentang suhu berkisar antara 200°C dan 500°C, dan melaporkan perubahan karakteristik biomassa setelah dikonversi menjadi arang. Ridjayanti *et al.* (2023) melakukan pirolisis pada limbah biomassa kayu karet, sedangkan Salim *et al.* (2019) melakukan pirolisis pada bambu betung,

dan mengatakan bahwa proses pirolisis menghasilkan arang dengan kandungan air rendah dengan sifat hidrofobik, yang mengakibatkan penyerapan air rendah, kandungan karbon tetap tinggi, sehingga nilai kalor lebih tinggi, dan kualitas biomassa yang lebih baik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dampak variasi suhu dan waktu tinggal pada pelet arang bambu betung dan kayu karet pada rentang suhu 350°C, 400°C, dan 450°C serta waktu tinggal 10, 20 dan 30 menit yang menjadi keterbaruan pada penelitian ini.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat pelet biomassa yang dihasilkan dan pengaruh proses pirolisis terhadap kualitas biochar yang dihasilkan dari proses pirolisis kayu karet dan pelet bambu betung di dalam *muffle furnace*. Diharapkan penelitian ini dapat membantu pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi alternatif di Indonesia dan pengembangan teknologi konversi biomassa menjadi energi terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan.

## **1.2 Tujuan**

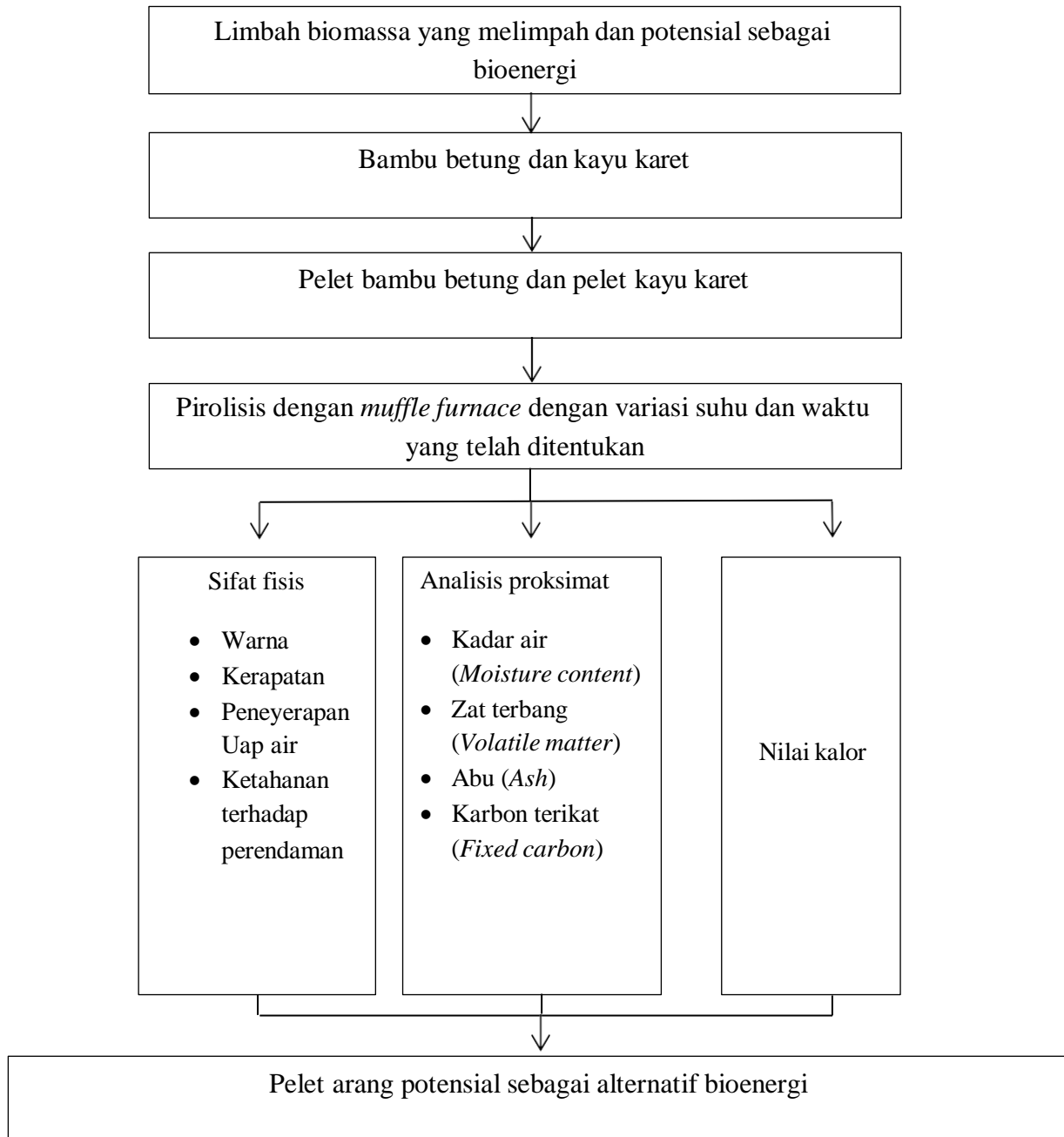
Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pirolisis dengan terhadap karakteristik fisis pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dan kayu karet (*Hevea brasiliensis*) sebagai sumber energi biomassa terbarukan.
2. Mengetahui pengaruh suhu dan waktu tinggal (*residence time*) pirolisis terhadap sifat energi pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dan kayu karet (*Hevea brasiliensis*) sebagai sumber energi biomassa terbarukan.

## **1.3 Kerangka Pemikiran**

Ketersediaan biomassa yang melimpah di Indonesia potensial untuk dimanfaatkan sebagai bioenergi. Bambu betung dan kayu karet merupakan salah satu biomassa yang tersedia melimpah di Indonesia. Sisa pemanfaatan keduanya seringkali dianggap limbah tidak terpakai. Densifikasi kedua biomassa menjadi pelet, digunakan sebagai bahan baku untuk diproses menjadi bioenergi yang kemudian

akan dilakukan perlakuan panas dengan oksigen terbatas (pirolisis) sehingga meningkatkan kualitas dari pelet biomassa tersebut. Pirolisis menggunakan *muffle furnace* dengan suhu 350°C, 400°C, dan 450°C. Kerangka pemikiran dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

## **II. TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Energi Terbarukan**

Kebutuhan energi setiap negara terus meningkat seiring dengan bertambahnya populasi, termasuk Indonesia. Sejalan dengan populasi Indonesia yang terus bertambah dari waktu ke waktu, maka kebutuhan dan konsumsi energi di Indonesia akan terus bertambah. Kebutuhan energi bagi masyarakat sangat penting bagi banyak aspek kehidupan manusia, termasuk ekonomi, transportasi, kesehatan, pendidikan, dan pertanian (Azirudin, 2019). Kebutuhan energi yang meningkat membutuhkan ketersediaan yang cukup untuk memenuhi kebutuhan akan energi, sehingga dibutuhkan energi yang dapat diperbarui. Berbeda dengan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam, yang memiliki persediaan terbatas, energi terbarukan dapat diproduksi dan berkelanjutan.

Dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar fosil, penggunaan energi terbarukan dianggap lebih bermanfaat bagi lingkungan karena dapat menurunkan emisi gas rumah kaca, yang merupakan penyebab utama perubahan iklim (Dwisari *et al.*, 2023). Selama ini, penggunaan bahan bakar fosil telah memberikan dampak yang merugikan, termasuk meningkatkan jumlah gas rumah kaca di atmosfer, sehingga menyebabkan perubahan iklim dan pemanasan global. Solusi yang dapat diambil sebagai upaya untuk melindungi lingkungan dan mengatasi kebutuhan energi yang meningkat, sumber energi yang semakin habis, serta masalah lingkungan lainnya seperti perubahan iklim dalam skala global, beberapa negara saat ini berusaha untuk meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan. Terdapat beberapa jenis energi terbarukan yang saat ini dimanfaatkan, antara lain energi panas matahari, energi angin, energi air, energi panas bumi, dan energi biomassa (Lubis, 2007).

## 2.2 Biomassa

Biomassa merupakan sumber karbon yang dapat diperbarui ketersediaannya, biomassa juga menjadi sumber energi karbon yang aman bagi lingkungan. Hal tersebut dikarenakan biomassa itu sendiri disediakan dan diperbarui oleh lingkungan secara terus-menerus dalam waktu yang relatif singkat, hal ini sangat berbeda dengan sumber energi fosil, seperti batu bara, minyak bumi dan sebagainya. Biomassa adalah sumber karbon yang hanya dapat ditemukan dan diperbarui ketersediaannya dan dapat diolah dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar dengan wujud apapun baik gas, cair maupun padatan (Ridhuan *et al.*, 2019). Biomassa juga dapat didefinisikan sebagai bahan organik yang berasal dari alam baik hewan maupun tumbuhan, seluruh bagian dalam alam yang mengandung karbon di dalamnya dapat diartikan sebagai biomassa karena memiliki potensi untuk menjadi sumber energi panas yang dapat dijadikan sebagai bahan bakar. Biomassa adalah sumber energi dari alam yang di dalamnya termasuk hewan dan tumbuhan yang memiliki sifat dapat diperbarui dan ramah lingkungan (Sudarmanta *et al.*, 2009).

Biomassa merupakan seluruh bahan organik yang berasal dari tanaman (termasuk alga, pohon dan tanaman) baik berupa produk maupun buangan (Suganal *et al.*, 2019). Sumber daya biomassa tersebut dianggap sebagai material organik, dimana energi sinar matahari disimpan dalam ikatan kimia melalui proses fotosintesis (Papilo *et al.*, 2015). Sumber lain mengatakan, segala sesuatu yang berkaitan dengan tanaman hidup, termasuk limbah organik dari manusia, tanaman, dan hewan, disebut sebagai biomassa (Fisafarani, 2010). Biomassa berasal dari tumbuhan, limbah pertanian, limbah hutan, kotoran hewan dan manusia (Arhamsyah, 2010). Material organik hidup umumnya mengandung air sekitar 80-90%. Sedangkan material organik yang sudah kering memiliki kandungan senyawa hidrokarbon yang tinggi (Adistia *et al.*, 2020). Senyawa tersebut sangat penting untuk potensi sumber energi. Bioenergi adalah konversi energi dari suatu biomassa. Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat melimpah yang berasal dari limbah pertanian, kehutanan, dan perkebunan sehingga sangat potensial untuk dijadikan energi terbarukan. Total biomassa dunia dalam hal energi memiliki kapasitas produksi potensial sebesar



33.000 EJ, yang setara dengan lebih dari 80 kali konsumsi energi tahunan dunia (Asmara *et al.*, 2023). Perkiraan potensi biomassa di Indonesia sebesar 146,7 juta ton per tahun yang berasal dari sektor pertanian, kehutanan dan perkebunan serta biomassa yang berasal dari sampah pada tahun 2020 diperkirakan sebanyak 53,7 juta ton (Parinduri, 2020). Potensi limbah biomassa kayu di Indonesia tercatat 2,7 juta ton/tahun dengan potensi energi sebesar 49,3 juta GJ/tahun (Kementerian ESDM, 2015).

Biomassa dapat ditemukan di tiap daerah di Indonesia, hal tersebut karena berlimpahnya sumber biomassa, sektor perkebunan, pertanian dan kehutanan yang saat ini menjadi salah satu sektor terbesar di Indonesia dapat memenuhi kebutuhan sumber energi biomassa nasional (Arsyad *et al.*, 2023). Bahan baku biomassa secara umum terdiri dari dua kategori utama yaitu pohon berkayu dan rerumputan. Saat ini, 50% dari potensi bioenergi berasal dari bahan kayu, sisanya berasal dari jerami yang berasal dari produk sampingan pertanian (Arsyad *et al.*, 2023). Salah satu penggunaan biomassa yang paling awal diketahui untuk energi adalah kayu gelondongan. Namun demikian, penggunaan kayu bulat non-energi yang lebih bernilai, seperti produksi *pulp* (bubur kayu), saat ini bersaing dengan penggunaannya untuk energi, sektor mebel, dan lain- lain yang mengakibatkan konsumsi pohon yang lebih tinggi dan biaya bahan baku yang lebih besar untuk mengubah biomassa menjadi bahan kimia yang terbuat dari gas sintetis. Bahan baku biomassa dianggap sebagai sumber daya terbarukan. Namun, biomassa memiliki beberapa kelemahan dibandingkan dengan bahan bakar fosil karena memiliki kandungan air yang tinggi, nilai energi yang lebih rendah, dan densitas volume yang lebih rendah, kandungan mineral dan oksigen yang tinggi, sangat higroskopis, serta tidak seragam dalam sifat fisiknya, yang menyebabkan kurang efisien dalam penggunaannya sebagai bahan bakar sumber energi (Hidayat *et al.*, 2021). Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar memerlukan pengolahan terlebih dahulu agar nilai kalornya dapat meningkat. metode untuk mengkonversi biomassa. Sudah jelas bahwa teknologi konversi biomassa yang berbeda akan menggunakan peralatan yang berbeda dan menghasilkan hasil yang berbeda pula. Pembakaran langsung, konversi termokimia, dan konversi

biokimia adalah tiga kategori besar yang dapat memisahkan proses konversi biomassa menjadi bahan bakar. Teknologi yang paling mudah adalah pembakaran langsung (Parinduri, 2020).

### 2.3 Pelet Kayu

Jenis bahan bakar biomassa padat yang dihasilkan dari limbah atau sisa kayu disebut pelet kayu. Jika dibandingkan dengan kayu bakar tradisional, pelet kayu menawarkan sejumlah manfaat, termasuk nilai kalor yang lebih besar, ukuran yang lebih konsisten, dan ramah lingkungan. Beberapa tahun terakhir ini, penggunaan pelet kayu sebagai bahan bakar mengalami peningkatan tajam, terutama di negara-negara industri, yang bertujuan mengurangi emisi gas rumah kaca dan penggunaan pada bahan bakar fosil (Pradhan *et al.*, 2018). Dengan menggunakan mesin pembuat pelet, serbuk gergaji atau potongan-potongan kecil kayu dikompres dan dipadatkan untuk membuat pelet kayu. Dengan meningkatkan densitas kayu, teknik ini berupaya untuk menurunkan emisi dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Selain itu, dibandingkan dengan kayu bakar tradisional, pelet kayu lebih mudah diangkut dan disimpan.

Limbah kayu dari sektor pengolahan kayu, seperti serbuk gergaji dan bagian kayu yang tidak terpakai, adalah sumber bahan utama yang digunakan dalam produksi pelet kayu. Namun, bahan baku lain juga dapat digunakan untuk membuat pelet kayu, termasuk limbah pertanian seperti jerami, bonggol jagung, dan tandan kosong dari kelapa sawit (Mushtaq *et al.*, 2019). Selain mengurangi pembuangan limbah, penggunaan limbah sektor pertanian dan kehutanan sebagai bahan baku pelet kayu juga meningkatkan nilai ekonomi limbah. Beberapa faktor seperti jenis bahan baku, tingkat kelembapan, kepadatan, dan kadar abu akan mempengaruhi kualitas pelet kayu. Kelembapan rendah, kepadatan tinggi, dan kadar abu rendah adalah karakteristik pelet kayu yang baik. Faktor-faktor tersebut dapat menghasilkan pembakaran yang lebih efektif, hal ini juga menurunkan emisi gas dan partikular berbahaya ke alam (Sultana *et al.*, 2012).

Pelet kayu dapat digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil atau besar baik sebagai bahan bakar maupun keperluan lainnya seperti untuk pemanas ruangan. Uap

panas yang dihasilkan dari pembakaran pelet kayu di dalam ketel atau tungku dapat menggerakkan turbin dan menghasilkan energi. Khususnya di daerah dengan pasokan biomassa yang melimpah, teknik ini dapat menawarkan sumber energi yang berkelanjutan dan terbarukan (Buitelaar *et al.*, 2003). Seiring dengan upaya untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan meningkatnya permintaan akan energi terbarukan, pasar pelet kayu masih terus berkembang.

#### **2.4 Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*)**

Bambu adalah biomassa yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan. Salah satu spesies bambu yang banyak digunakan di Indonesia adalah bambu betung (*Dendrocalamus asper*) (Saputra *et al.*, 2022). Bambu adalah tanaman yang tumbuh cepat, mudah dirawat, dan juga dapat diperbaharui, sehingga menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan (*environmentally friendly*) seperti pada Gambar 2. Sifat bambu yang menyerap banyak karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan nitrogen, bambu juga dapat mengurangi polusi di lingkungan (Zustika *et al.*, 2025). Potensi longsor, banjir, dan erosi tanah dapat minimalisir dengan menanam bambu (Rahayu *et al.*, 2024). Dalam bidang ekonomi, bambu juga memiliki keunggulan yang signifikan. Meskipun harga jualnya masih rendah, namun jika diolah dengan baik dan bertanggung jawab, maka produk turunannya dapat memiliki nilai ekonomi yang signifikan. Bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dapat menjadi salah satu jenis biomassa padat yang dapat dibakar langsung untuk menghasilkan panas dan energi listrik (Asmunandar *et al.*, 2023).

Bambu betung (*Dendrocalamus asper*) mengandung selulosa, lignin, silika, pentosan, dan abu. Bambu betung memiliki kandungan selulosa sebesar 42,4-53,6%, lignin antara 19,8-26,6%, abu antara 1,24-3,77%, pentosan antara 1,24-3,77%, dan silika antara 0,1-1,78% (Dewi *et al.*, 2023). Bambu dapat dimanfaatkan sebagai biomassa untuk bahan bakar padat melalui proses pirolisis dan densifikasi (Salim *et al.*, 2019).

Taksonomi tanaman bambu betung adalah sebagai berikut (Priyanto, 2015):

Kingdom : Plantae  
Divisi : Spermatophyta  
Subdivisi : Angiospermae  
Kelas : Monocotyledonae  
Ordo : Graminales  
Famili : Graminae  
Subfamili : Bambusoideae  
Genus : *Dendrocalamus*  
Spesies : *Dendrocalamus asper*



Sumber: <https://ksdae.menlhk.go.id>

Gambar 2. Bambu betung (*Dendrocalamus asper*).

## 2.5 Pohon Karet (*Hevea brasiliensis*)

Tanaman karet, yang secara ilmiah dikenal sebagai *Hevea brasiliensis*, adalah tanaman yang berasal dari Amerika Latin, khususnya Brasil. Tanaman ini telah digunakan sebagai tanaman perkebunan sejak abad ke-18 (Ardhiyan, 2013). Henry A.

Wickman adalah orang yang pertama kali mengenalkan tanaman karet di Indonesia pada tahun 1876 ketika ia menanam beberapa bibit karet di kebun percobaan pertanian di Bogor. Pada tahun 1890, ia menambahkan lebih banyak bibit karet. Namun, menumbuhkan tanaman ini membutuhkan waktu yang lama (Ardhiyan, 2013). Pohon karet yang sudah dewasa dapat mencapai ketinggian 15 hingga 25 meter. Menurut Kumar *et al.* (2009) Tanaman karet adalah tanaman berkayu dengan batang yang agak lebar. Pohon yang sudah dewasa memiliki bentuk yang kokoh, tegak, tinggi 15-25 meter, dan dapat bertahan hingga 100 tahun. Umur komersial tanaman karet dibatasi hingga 25-30 tahun, setelah itu tanaman tersebut direvitalisasi. Ketika masa penyadapan berakhir, tanaman karet menghasilkan batang kayu yang mengandung lignoselulosa yang relatif tinggi sehingga bagus dijadikan sebagai bahan bakar biomassa (Admojo *et al.*, 2018). Genus *Hevea* memiliki beberapa spesies, namun, hanya *H. brasiliensis* yang menghasilkan lateks yang memiliki nilai komersial karena daya produksi lateks yang tinggi. Menurut Ayu *et al.* (2015) Tanaman karet merupakan salah satu jenis tanaman hutan yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan getah, yang merupakan hasil hutan bukan kayu.

Limbah kayu karet memiliki potensi sebagai sumber biomassa untuk berbagai macam penggunaan. Biomassa adalah bahan organik yang dapat digunakan sebagai sumber energi yang berkelanjutan dan dihasilkan dari tanaman, hewan, atau produk sampingan (Kumar *et al.*, 2009). Salah satu jenis biomassa yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit energi, bahan baku industri, atau bahan bakar alternatif adalah limbah kayu karet yang dihasilkan oleh industri pengolahan karet alam. Sejumlah besar limbah kayu karet dihasilkan setiap tahunnya oleh industri karet alam. Sekitar 25% dari seluruh berat pohon karet dibuang sebagai limbah kayu karet selama proses pengolahan kayu karet menjadi produk sampingan seperti meubel dan kayu bangunan (Laemsak *et al.*, 2012). Limbah kayu karet sering kali dibakar atau dibuang begitu saja, sehingga menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan membuang-buang sumber daya berharga. Penggunaan sisa kayu karet sebagai biomassa merupakan pilihan yang menguntungkan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Limbah kayu karet dapat diubah menjadi energi panas, listrik, atau bahan bakar cair dengan

metode seperti gasifikasi, pirolisis, atau pembakaran langsung (Abnisa *et al.*, 2013). Selain itu, limbah kayu karet dapat dikonversi menjadi bahan baku barang seperti komposit, pelet, dan arang aktif (Zabihian *et al.*, 2020).

Dengan hutan yang luas, potensi kayu yang melimpah, dan industri pengolahan kayu yang cukup besar, Indonesia memiliki pasokan energi biomassa yang berlimpah dalam bentuk limbah kayu (Harjanto *et al.*, 2016). Salah satu limbah biomassa yang potensial adalah limbah kayu tanaman karet (Gambar 3). Menurut data BPS tahun 2020, secara keseluruhan terdapat 3,68 juta ha perkebunan karet di Indonesia, dengan 3,25 juta ha diantaranya merupakan perkebunan karet rakyat. Hal tersebut menjadi alasan dari ketersediaan sumber biomassa yang besar dari tanaman karet untuk dijadikan bioenergi menggunakan limbah kayu pohon karet yang sudah tidak produktif lagi.

Taksonomi tanaman karet adalah sebagai berikut:

Divisi : Spermatophyta  
 Subdivisi : Angiospermae  
 Kelas : Dicotyledonae  
 Ordo : Euphorbiales  
 Famili : Euphorbiaceae  
 Genus : *Hevea*  
 Spesies : *Hevea brasiliensis*

Upaya peremajaan industri karet adalah alasan dari sejumlah besar limbah kayu karet yang dihasilkan dari area perkebunan karet yang luas. Tanaman karet yang tidak lagi dapat menghasilkan lateks akan menjalani peremajaan. Sebagai produk sampingan dari lateks berupa kayu tanaman karet, tanaman karet akan ditebang, dan tanaman karet baru akan ditanam sebagai gantinya (Faizal *et al.*, 2014). Tanaman ini juga akan menghasilkan limbah berupa akar, ranting, dan daun (Matangaran, 2012). Proses pirolisis, yang menghasilkan briket, adalah salah satu cara untuk mengubah limbah kayu karet menjadi energi alternatif (Ridjayanti *et al.*, 2021).



Sumber: <https://ksdae.menlhk.go.id>

Gambar 3. Pohon karet (*Hevea brasiliensis*).

## 2.6 Pirolisis

Penguraian panas senyawa organik dengan sedikit atau tanpa oksigen dikenal sebagai pirolisis Teknik yang disebut pirolisis menggunakan berbagai jenis biomassa untuk memproduksi *biofuel*. Teknologi pirolisis ini dapat secara signifikan mengurangi limbah biomassa sambil meningkatkan nilai tambah (Hanif *et al.*, 2016). Pirolisis adalah proses pemecahan kimia yang berdasarkan pada pemanasan dan menggunakan sedikit atau tanpa oksigen selama pembakaran (Ridhuan *et al.*, 2019). Menurut Basu (2018), rentang suhu tipikal untuk pirolisis biomassa berkisar antara 300°C dan 1000°C. Suhu tinggi diterapkan pada bahan baku biomassa selama proses untuk menghasilkan produk padat (biochar), cair (*bio oil*) dan gas (*syngas*) (Bridgwater, 2012). Proses pirolisis adalah penguraian senyawa-senyawa penyusun biomassa seperti selulosa. Chen *et al.* (2022) menerangkan bahwa penguraian selulosa pada proses pirolisis memproduksi *bio-oil*. Usino *et al.* (2021) menjelaskan



bahwa selulosa menghasilkan biochar yang lebih sedikit dari penguraian lignin pada proses pirolisis karena lebih mudah terdekomposisi dan volatilisasinya lebih tinggi.

Biochar, *bio oil*, dan *syngas* pirolisis adalah tiga produk utama dari proses pirolisis biomassa. Setiap dari ketiga produk ini memiliki karakteristik dan keunggulan unik karena dihasilkan melalui pirolisis biomassa. Pirolisis dari biomassa akan menghasilkan zat baru seperti gas dan arang. Gas dari pirolisis dapat dibedakan menjadi gas yang tidak dapat dikondensasi ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , dll.) dan gas yang dapat dikondensasi (tar). Minyak akan terjadi pada proses kondensasi dari gas yang terbentuk, disebut juga *bio oil*. Biochar, residu padat yang kaya karbon dapat meningkatkan kualitas tanah dengan berfungsi sebagai penyerap karbon. Biochar merupakan residu padat berkarbon tinggi yang terbentuk dari dekomposisi biomassa pada suhu  $300\text{-}1000^\circ\text{C}$ . Produk ini memiliki struktur berpori dan luas permukaan besar, membuatnya efektif sebagai penyimpan karbon jangka panjang. Aplikasinya meliputi perbaikan kesuburan tanah melalui peningkatan retensi air dan nutrisi, serta adsorben polutan (Ridhuan *et al.*, 2019).

Menurut Chen *et al.* (2022) saat proses pirolisis biomassa, lignin menghasilkan lebih banyak biochar karena struktur aromatik yang stabil dan sulit terurai sepenuhnya pada suhu pirolisis dibandingkan dengan selulosa dan hemiselulosa. Uap pirolisis mengembun untuk menghasilkan *bio-oil*, cairan kental yang dapat digunakan sebagai bahan baku atau bahan bakar alternatif di industri kimia. Gas pirolisis, di sisi lain, adalah campuran gas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi, termasuk karbonmonoksida, metana, dan hidrogen (Asmunandar *et al.*, 2023). Salah satu faktor yang paling penting untuk dikaji dalam proses pirolisis adalah perubahan suhu dan waktu tinggal. Perubahan suhu dan waktu tinggal sangat penting untuk dikaji karena berkaitan dengan kondisi penguraian bahan kimia di dalam biomassa (Ridhuan *et al.*, 2019).

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Workshop Teknologi Hasil Hutan sebagai tempat melakukan pirolisis. Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung sebagai tempat pengujian sifat fisis dan analisis proksimat hasil pirolisis. Analisis XRD dan FTIR dilakukan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung, penelitian ini dilakukan pada bulan Januari hingga bulan Mei 2025.

#### **3.2. Alat dan Bahan**

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: *muffle furnace*, krusibel 30 ml, tang krusibel, jangka sorong digital (skala 0,01 mm), timbangan listrik (skala 0,0001 g), oven (BJPX - Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia), kolorimeter (AMT507, Amtast, Qingdao, China). Bahan penelitian ini didapatkan secara komersial, pelet bambu betung diperoleh dari BRIN dan pelet kayu karet diperoleh dari PT Indokarya Global Jaya dan alumunium foil.

#### **3.3. Metode Pengambilan Data**

##### **1 Penyaringan dan penyortiran pelet**

Penyaringan pelet kayu karet dan pelet bambu betung untuk menghilangkan debu ataupun serbuk sisa pelet yang masih menempel pada pelet, kemudian dilakukan penyortiran pelet yang memiliki panjang 2-3 cm. Pelet biomassa yang digunakan untuk tiap variasi suhu dan waktu adalah 25 buah pelet, dengan jumlah total pelet yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebanyak 452 buah pelet biomassa.

Setelah penyaringan dan penyortiran pelet telah selesai, maka selanjutnya adalah proses pirolisis pengoperasian alat *muffle furnace*.

## 2. Pirolisis menggunakan *muffle furnace*

Pirolisis dilakukan menggunakan *muffle furnace* (Gambar 4) dengan memberikan perlakuan panas terhadap pelet. Pirolisis dilakukan dengan target suhu yang berkisar 350°C, 400°C, 450°C dan variasi waktu tinggal (*residence time/RT*) 10, 20, dan 30 menit. Saat suhu pada *muffle furnace* telah mencapai target, maka 3 buah krusibel yang telah berisi pelet biomassa berjumlah 4-5 buah per krusibel dimasukkan kedalam *muffle furnace* lalu ditutup dan ditunggu hingga RT yang telah ditentukan (proses pirolisis sedang berlangsung). Setelah pirolisis selesai, *muffle furnace* dibuka dan krusibel segera dikeluarkan menggunakan tang krusibel dan krusibel dimasukkan kedalam pasir yang telah disediakan hingga suhu krusibel menurun. Hal yang sama dilakukan pada target suhu lain dengan masing-masing RT yang telah ditentukan.



Sumber: <https://hysc.co.kr/wp/wp-content>

Gambar 4. Muffle furnace.

### 3.3.2 Analisis Karakteristik

#### 1. Sifat fisis

Analisis sifat fisis yang dilakukan berupa sifat fisis seperti warna, kerapatan, penyerapan uap air, dan ketahanan terhadap air.

##### a. Warna

Uji sifat fisis yang pertama adalah uji warna, uji ini dilakukan ketika sebelum dan sesudah proses pirolisis. Parameter-parameter yang diuji antara lain: kecerahan ( $L^*$ ), perubahan warna secara keseluruhan ( $\Delta E^*$ ), kromatisasi merah/hijau ( $a^*$ ) dan kuning/biru ( $b^*$ ).

Perubahan warna secara keseluruhan dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Keterangan:

$\Delta E^*$  = perubahan warna akibat perlakuan

$\Delta L^*$  = perbedaan nilai kecerahan ( $L^*$ ) sebelum dan sesudah perlakuan

$\Delta a^*$  = perbedaan antara nilai ( $a^*$ ) sebelum dan sesudah perlakuan

$\Delta b^*$  = perbedaan antara nilai ( $b^*$ ) sebelum dan sesudah perlakuan

Perubahan warna diklasifikasikan ke dalam 6 rentang nilai dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi warna

No.	Nilai Klasifikasi	Klasifikasi
1.	$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$	Perubahan Dapat Diabaikan
2.	$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	Perubahan Warna Sedikit
3.	$1,5 < \Delta E^* \leq 3$	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 *et al.* (2014).

#### b. Kerapatan

Kerapatan adalah perbandingan massa dan volume. Kerapatan pelet dihitung berdasarkan (SNI 8675-2018), nilai kerapatan sendiri dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

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

Keterangan:

KR = kerapatan (g/cm<sup>3</sup>)

M = massa pelet (g)

#### c. Penyerapan uap air

Uji ini dilakukan dengan menempatkan pelet hasil pirolisis pada suhu ruangan. Sampel diukur peningkatan massanya selama 2 minggu atau 14 hari hingga sampel mencapai berat konstan.

#### d. Uji ketahanan perendaman air

Uji ini dilakukan dengan cara merendam pelet bambu betung dan kayu karet ke dalam air dan dilihat perubahan fisik yang dapat dilihat secara visual yang terjadi pada pelet bambu betung dan pelet kayu karet setelah perendaman dengan waktu 1 menit, 1 jam, 6 jam, 12 jam, 24 jam.

### 2. Analisis Proksimat

Untuk mengetahui efisiensi dari suatu pembakaran hasil pirolisis pelet bambu betung dan pelet kayu karet, maka analisis proksimat digunakan. Analisis proksimat pelet biomassa hasil pirolisis dapat meliputi: kadar air, kadar abu, zat volatil, dan kadar karbon terikat. Arang terdiri dari air, bahan volatil, bahan anorganik (abu) dan karbon terikat (Kwon *et al.*, 2018).

#### a. Kadar air

Teori mendasar dari kadar air (*moisture content*/MC) dalam suatu biomassa adalah mengeluarkan kandungan air pada suatu benda hingga seimbang kadar air udara sekitar. Uji ini dilakukan dengan berdasarkan standar SNI 8675:2018. Berat

kering udara (BKU) dan berat kering oven (BKO) kadar air pelet hasil pirolisis didapatkan dengan mengukur massa pelet pirolisis sebelum dan setelah dikeringkan dalam oven. Perhitungan kadar air (KA) pada pelet hasil pirolisis dapat didapat dengan rumus berikut:

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

Keterangan:

KA = kadar air (%)

BA = berat awal (g)

BKO = berat kering oven (g)

#### b. Kadar abu (*ash*)

Persentase kandungan mineral yang tidak menguap dan menjadi residu pada saat pembakaran adalah pengertian dari kadar abu. Analisa uji kadar abu mengacu sesuai SNI 8675-2018 dengan menyiapkan sampel pelet kontrol dan pirolisis yang sudah dihaluskan seberat 1 gram ke dalam krusibel kemudian dipanaskan dengan suhu 750°C dalam waktu 1 jam. Kadar abu dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

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

#### c. Zat terbang

Zat terbang atau *volatile matter* (VM) merupakan persentase kehilangan berat akibat pemanasan tanpa udara luar. Analisis bahan mudah menguap berdasarkan standar SNI 8675-2018 dengan menyiapkan sampel pelet kontrol dan pirolisis yang sudah dihaluskan seberat 1 gram kedalam krusibel kemudian dipanaskan dengan suhu 950°C dalam waktu 7 menit. Zat terbang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Zat terbang (\%)} = \frac{\text{Sampel setelah pemanasan (g)}}{\text{Berat sampel kering (g)}} \times 100\%$$

#### d. Karbon terikat

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

$$\text{Karbon terikat (\%)} = 100\% - (\% \text{Kadar Abu} + \% \text{Zat Terbang})$$

### 3. Nilai Kalor

Nilai kalor (*heating value/HV*) biomassa merupakan ukuran energi yang dihasilkan ketika sejumlah massa biomassa tertentu dibakar secara sempurna. Nilai kalor dihitung menggunakan pendekatan perhitungan dari analisis proksimat (Hidayat *et al.*, 2021) dengan memakai rumus sebagai berikut:

$$\text{HHV (MJ/kg)} = (0,356 * \text{FC}) + (0,1559 * \text{VM}) - (0,0078 * \text{Ash})$$

Keterangan :

HHV = Nilai Kalor

FC = Karbon terikat

VM = Zat volatil / menguap

Ash = Kadar abu

### 3.4. Analisis data

#### 1. Deskriptif Statistik

Rata-rata, persentase, dan simpangan baku, dihitung menggunakan Microsoft Excel 2010 untuk menganalisis data penelitian dan mengetahui tentang distribusi dan karakteristiknya.

#### 2. Pengolahan Data dan Visualisasi

Pengolahan data dilakukan di Excel dengan menggunakan fitur pengurutan, penyaringan, dan pembuatan grafik, seperti grafik batang dan grafik garis, untuk memvisualisasikan tren dan pola dalam data.



## V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Karakteristik fisis dari pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dan pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) mengalami perubahan yang signifikan, perubahan warna keseluruhan dari kedua pelet biomassa ( $\Delta E^*$ ) berada di nilai  $>12$  untuk semua pelet hasil pirolisis yang berarti berubah secara keseluruhan, perubahan tersebut dapat dilihat dengan jelas secara visual, pelet kontrol yang awalnya berwarna coklat kekuningan setelah dipirolisis dengan suhu  $350^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ , dan  $450^{\circ}\text{C}$  serta waktu tinggal 10 menit, 20 menit, dan 30 menit kedua jenis pelet biomassa berubah menjadi berwarna hitam setelah dipirolisis, perubahan signifikan juga terjadi dikerapatan biomassa, kerapatan biomassa setelah di pirolisis menjadi menurun signifikan hingga nilai terendahnya untuk pelet bambu betung  $0,62 \text{ g/cm}^3$  sebesar dan pelet kayu karet sebesar  $0,45 \text{ g/cm}^3$ . Perubahan signifikan juga terjadi pada daya adsorpsi uap air, pelet biomassa kontrol mengalami perubahan berat setiap harinya  $> 10\%$  sedangkan pelet hasil pirolisis  $<10\%$ , hal ini akan meningkatkan daya simpan pelet. Daya serap air juga terjadi perbedaan yang signifikan antara pelet kontrol dan pelet pirolisis, dimana dalam 1 jam perendaman pelet kontrol sudah mengalami deformasi dan perubahan warna air, di 24 jam perendaman pelet kontrol sudah hancur dengan warna air keruh sedangkan pelet pirolisis hingga 24 jam perendaman belum mengalami deformasi.
2. Pirolisis memberikan pengaruh terhadap sifat energi yang signifikan, dapat dilihat dari hasil analisis prosimat dan nilai kalor kedua pelet dimana kualitas dari kadar air, kadar abu, zat volatil, karbon terikat dan nilai kalor pada kedua pelet biomassa

hasil pirolisis meningkat kualitasnya, sifat energi biomassa mengalami peningkatan kualitas setelah perlakuan suhu dan waktu. Kadar air pada ke dua biomassa menurun bertahap dari kondisi kontrol yang awalnya berkisar antara 9,33% dan 10,18%, hingga menjadi 1,18% dan 1,09% setelah perlakuan. Kadar abu juga menunjukkan kenaikan secara bertahap, dari 1,67% dan 1,83% pada kontrol pelet bambu betung dan kayu karet menjadi 3,03% dan 2,53% setelah perlakuan. merupakan komponen mudah menguap pada suhu rendah juga menurun dari sekitar 77,1% untuk pelet bambu betung dan 78,7% untuk pelet kayu karet kontrol menjadi sekitar 70,93% untuk pelet bambu betung dan 72,15% untuk pelet kayu setelah perlakuan. Sementara itu, kadar karbon terikat mengalami peningkatan, dari kurang dari 11,74% dan 9,38% pada kontrol menjadi 20,38% untuk pelet bambu betung dan 19,13% untuk pelet kayu pada perlakuan suhu dan waktu tertinggi. Nilai kalor pelet biomassa meningkat setelah pirolisis. Sampel kontrol memiliki nilai kalor sekitar 16,1 MJ/kg untuk pelet bambu betung dan 15,5 MJ/kg untuk pelet kayu karet. Setelah dipirolisis pada suhu 350°C selama 10–30 menit, nilai kalor naik menjadi sekitar 18–20 MJ/kg untuk kedua pelet biomassa. Pada suhu 400°C, nilai kalor meningkat lagi menjadi sekitar 20–24 MJ/kg untuk pelet bambu betung dan 20–22 MJ/kg untuk pelet kayu karet. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada suhu 450°C selama 30 menit, yaitu sekitar 24,5 MJ/kg untuk pelet bambu betung dan 24,6 MJ/kg untuk pelet kayu karet. Semakin tinggi suhu dan waktu pirolisis, semakin besar nilai kalor yang dihasilkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., Daud, W.M.A., Ramalingam, S., Sahu, J.N. 2013. Biomass co-firing with coal in industrial fluidized bed combustion boilers: An overview. *Journal of the Energy Institute*. 86(4): 207-215.
- Abdullah, K., Zulfa, Z., Jyoti, M.D. 2016. Pengaruh penambahan tandan kosong kelapa sawit terhadap kualitas briket berbahan utama limbah kulit singkong. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*. 27(1): 49-58.
- Adistia, N.A., Nurdiansyah, R.A., Fariko, J., Vincent., Simatupang, J.W. 2020. Potensi energi panas bumi, angin, dan biomassa menjadi energi listrik di Indonesia. *Tesla*. 20(2): 105-116.
- Admojo, L., Setyawan, B. 2018. Potensi pemanfaatan lignoselulosa dari biomassa kayu karet (*Hevea brasiliensis muell arg.*). *Warta Perketan*. 37(1): 39–50.
- 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: e00202.
- Apriyanto, A., Tohirin, M. 2022. Kaji eksperimental konversi biomassa sampah menjadi bahan bakar terbarukan menggunakan proses torefaksi. *Jurnal Teknik Sains*. 7(1): 42-52.
- Ardhiyan, S. 2013. Faktor-faktor yang mempengaruhi konversi tanaman karet menjadi kelapa sawit di Kabupaten Muaro Jambi. *Jurnal Ilmiah Sosio-Ekonomika Bisnis*. 16(2): 18-25.
- Arhamsyah. 2010. Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 2(1): 42-48.

- Arsyad, A., Yana, S., Radhiana, R., Ulfia, U., Fitriliana, F., Juwita, J. 2023. Kendala teknologi, pendanaan dan ketersediaan bahan baku biomassa dalam pengembangan energi terbarukan. *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1): 6473-6478.
- Asmara, S., Juli, F., Purba, K., Suri, I.F., Hidayat, W. 2023. Production and characterization of bio-briquettes from the cassava stems and bamboo charcoal bonded with organic adhesive. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. 18(2): 407-413.
- Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., Yuliarningsih, R. 2023. Evaluasi pengaruh suhu dan waktu pirolisis biochar bambu betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1): 4760-4771.
- Ayu, H.Y., Qurniati, R., Hilmanto, R. 2015. Analisis finansial dan komposisi tanaman dalam rangka persiapan pengajuan izin HKm (Studi kasus Desa Margosari Kecamatan Pagelaran Utara Kabupaten Pringsewu). *Jurnal Sylva Lestari*. 3(1): 31-40.
- Azirudin, T. 2019. Potensi energi angin di atas bangunan bertingkat di Pangkalan Kerinci, Kabupaten Pelalawan, Provinsi Riau. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*. 18(1): 23–28.
- Badan Pusat Statistik. 2020. *Jumlah dan Persebaran Penduduk*. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- Badan Pusat Statistik. 2018. *Statistik Karet Indonesia 2017*. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- Basu, P. 2018. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Academic press. Halifax.
- Bartocci, P., Barbanera, M., Skreiberg., Wang, L., Bidini, G., Fantozzi, F. 2018. Biocarbon pellet production: Optimization of pelletizing process. *Chemical Engineering Transactions*. 65(6): 55-61.
- Bazenet, R.A., Hidayat, W., Ridjayanti, S.M., Riniarti, M., Banuwa, I.S., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh kadar perekat terhadap karakteristik briket arang limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 10(3): 283-295.
- Blair, M.J., Gagnon, B., Klain, A., Kulišić, B. 2021. Contribution of biomass supply chains for bioenergy to sustainable development goals. *Land*. 10(2): 181.

- Bridgwater, A.V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 38: 68-94.
- Buitelaar, M.R., Belzig, W., Nussbaumer, T., Babić, B., Bruder, C., Schönenberger, C. 2003. Multiple Andreev Reflections (MAR) in a carbon nanotube quantum dot. *Physical Review Letters*. 91(5): 057005.
- Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., Zhang, H. 2022. Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. *Combustion and Flame*. 242: 112142.
- Dahlia, E., Ginting, Z., Ishak, R. Pemanfaatan limbah serabut kelapa sawit (*Elaeis guineensis jacq*) sebagai sumber energi alternatif dalam pembuatan biopellet. *Chemical Engineering Journal Storage*. 2(2):11.
- Dewi, R.K., Daryono, E.D., Jimmy, J., Dwi, M.R., Sukarno, L.B., Zulfian, M. 2023. Potensi bambu sebagai alternatif bahan bakar briket dengan teknologi sederhana. *Prosiding SENIATI*. 7(1): 128-135.
- Dwisari, V., Sudarti, S., Yushardi, Y. 2023. Pemanfaatan energi matahari: Masa depan energi terbarukan. *Jurnal Pendidikan Fisika*. 7(2): 376-384.
- Faizal, M., Andynapriatiwi, I., Destriana, P., Putri, A. 2014. Pengaruh komposisi arang dan perekat terhadap kualitas biobriket dari kayu karet. *Jurnal Teknik Kimia*. 2(20): 36-44.
- Farel, H. 2006. Pengaruh nilai kalor (*heating value*) suatu bahan bakar terhadap perencanaan volume ruang bakar ketel uap berdasarkan metode penentuan nilai kalor bahan bakar yang digunakan. *Jurnal Sistem Teknik Industri V*. 7(1): 60-65.
- Fisafarani, H. 2010. *Identifikasi Karakteristik Sumber Daya Biomassa dan Potensi Bio-Pellet di Indonesia*. Skripsi. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Guo, F., Dong, Y., Dong, L., Guo, C. 2014. Hydrogen-rich gas production by catalytic gasification of biomass in a double reactor combined with a microwave pyrolysis reactor and a continuous multi-baffled entrained flow gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 39(22): 11400-11410.
- Hanif, M. 2016. Perancangan proses konversi mikroalga menjadi biofuel sebagai inovasi teknologi ramah lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan BPPT*. 16(1): 1-8.

- Harjanto, N.T. 2016. Dampak lingkungan pusat listrik tenaga fosil dan prospek PLTN sebagai sumber energi listrik nasional. *Jurnal BATAN*. (1): 39–50.
- Haryanto, A., Megasepta, R., Wisnu, F.K., Asmara, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Triyono, S. 2022. Use of corncob biochar and urea for pakchoi (*Brassica rapal.*) cultivation: Short-term impact of pyrolysis temperature and fertiliser dose on plant growth and yield. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*. 123(2): 189-195.
- Hayati, N. 2018. Optimasi kondisi pirolisis dan pengeringan pada proksimat arang tempurung kelapa dengan metode taguchi. *Simetris*. 12(1): 6-12.
- Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I.S., Lee, S. 2021. Characteristics of biochar produced from the harvesting wastes of meranti (*Shorea sp*) and oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 749(1): 012040.
- Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Haryanto, A. 2020. Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*. 14(2): 169-181.
- Hidayat, W., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D.A., Haryanto, A., Yoo, J., Hasanudin, U. 2021. Effects of torrefaction using COMB dryer/pyrolizer on the properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and jabon (*Anthocephalus cadamba*) pellets. *Prosiding International Conference on Sustainable Biomass*. 202: 209-213.
- 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.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., and Kim, N.H. 2017a. Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* woods. *BioResources*. 12(4): 7539–7551.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H.M., Kondo, T., Kim, N.H. 2017b. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture*. 62(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.

- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-sifat Kayu*. Pusaka Media. Bandar Lampung.
- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2015. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) Wood. *BioResources*. 10(4): 6961-6974.
- Ilma, R.Z., Abidin, A., Bahri, M.H. 2024. Produksi briket bioarang dari limbah serbuk kayu jati dengan metode pirolisis. *National Multidisciplinary Sciences*. 3(1): 423-432.
- Jannah, R. 2018. *Pengaruh Jenis Perekat Terhadap Nilai Kalor Briket Arang Tempurung Kawista (Limonia acidissima) Teraktivasi NaOH*. Skripsi. Universitas Islam Negeri. Malang.
- Jiang, Y., Khadilkar, M.R., Al-Dahhan, M.H., Dudukovic, M.P. 2002. CFD of multiphase flow in multibaffle reactors with/without rotating impeller. *AIChE Journal*. 48(10): 2099-2115.
- Kadarwati, S., Apriliani, E., Annisa, R.N., Kurniawan, C. 2021. From waste to energy: konversi termal limbah pengolahan kayu menjadi bio-oil melalui teknik pirolisis. *Pemanfaatan sumber daya alam Indonesia: Ketahanan pangan, Energi dan Material Maju*. 160-187.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2015. *Renstra Kementerian ESDM Tahun 2015-2019*. Laporan. Kementerian ESDM. Jakarta.
- Kholil, A. 2017. *Analisis Briket Arang dari Sampah Berbahan Alami Kulit Buah dan Pelepah Salak*. UIN. Malang.
- Kumar, A., Jones, D.D., Hanna, M.A. 2009. Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*. 2(3): 556-581.
- Kwon, G.J., Kim, A.R., Lee, H.S., Lee, S.H., Hidayat, W., Febrianto, F., Kim, N.H. 2018. Characteristics of white charcoal produced from the charcoal kiln for thermotherapy. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 46(5): 527-540.
- Laemsak, N., Khongnakorn, W. 2012. Utilization of wood-rubber dust waste as a potential biomass resource for energy industry. *Energy Procedia*. 14: 476-482.

- Lubis, A. 2007. Energi terbarukan dalam pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 8(2): 155-162.
- Matangaran, J.R., Anggoro, R. 2012. Limbah pemanenan jati di Banyuwangi Jawa Timur. *Jurnal Perennial*. 8(2): 88-92.
- Mauritio, P., Duryat, M.R., Hidayat, W. 2022. Pengaruh variasi suhu torefaksi terhadap perubahan warna dan sifat fisik pelet kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). *Warta Rimba: Jurnal Ilmiah Kehutanan*. 10(5): 1-7.
- Mushtaq, F., Abdullah, R., Mat, R., Ani, F.N., Zahid, W.M. 2019. Biomass solid fuel production from palm wastes and its characteristics. *Journal of Cleaner Production*. 25(2): 1108-1122.
- Papilo, P. 2015. Penilaian potensi biomassa sebagai alternatif energi kelistrikan. *Jurnal Pasti*. 9(2): 164-176.
- Pangarkar, K., Schildhauer, T.J., van Ommen, J.R., Nijenhuis, J., Moulijn, J.A., Kapteijn, F. 2008. Structured packings for multiphase catalytic reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 47(10): 3720-3751.
- Parinduri, T. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2): 88-92.
- Pradhan, P., Arora, A., Mahajani, S.M. 2018. Production of fuel pellets from biomass. *AIMS Energy*. 6(5): 929-958.
- Priyanto, A. 2015. *Sintesis dan Aplikasi Silika dari Abu Daun Bambu Petung (Dendrocalamus asper) untuk Mengurangi Kadar Ammonium dan Nitrat pada Limbah Cair Tahu*. Skripsi. UIN Semarang. Semarang.
- Priyanto, P., dan Abdulah, L., 2014. Effects of torrefaction temperature on the characteristics of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(2): 339–353.
- Pudjiastuti, W., Listyarini, A., Rizki, M.I. 2013. Pengaruh laju transmisi uap air polimer blend Polibutilen Suksinat (PBS) dan Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) terhadap umur simpan sup krim instan rasi. *Jurnal Kimia dan Kemasan*. 35(1): 1-5.
- Putri, R.L., Rochmawati, L., Nandika, D., Darmawan, I. 2020. Pengawetan bambu dengan metode boucherie. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 25(4): 618-626.



- Rahayu, E.M., Syarifuddin, A. 2024. Edukasi pendekatan vegetatif dalam upaya pencegahan longsor di Desa Sukomulyo Kecamatan Pujon Kabupaten Malang. *Inovasi Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 2(3): 465-472.
- Rani, I.T., Yoo, J., Park, B.B., Hidayat, W., Wijaya, B.A., Lee, S., Kim, S. 2023. Wood pellet driven-biochar characterization produced at different targeted pyrolysis temperatures. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(3): 558-571.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Inthifawzi, R. 2019. Proses pembakaran pirolisis dengan jenis biomassa dan karakteristik asap cair yang dihasilkan. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. 8(1): 69-78.
- Ridhuan, K., Suranto, J. 2017. Perbandingan pembakaran pirolisis dan karbonisasi pada biomassa kulit durian terhadap nilai kalori. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. 5(1): 50-56.
- Ridjayanti, S.M., Bazenet, R.A., Hidayat, W., Banuwa, I.S., Riniarti, M. 2021. Pengaruh variasi perekat tapioka terhadap karakteristik briket arang limbah kayu sengon (*Falcataria moluccana*). *Jurnal Perennial*. 17(1): 5-10.
- Ridjayanti, S.M., Bazenet, R.A., Banuwa, I.S., Riniarti, M., Hidayat, W. 2023. Karakteristik arang kayu karet (*Hevea brasiliensis*) yang diproduksi menggunakan dua tipe tungku pirolisis. *Jurnal Belantara*. 6(1): 12-22.
- Ristianingsih, Y., Ulfa, A. 2015. Pengaruh suhu dan konsentrasi perekat terhadap karakteristik briket bioarang berbahan baku tandan kosong kelapa sawit dengan proses pirolisis. *Konversi*. 4(2): 16-22.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331.
- Rustamaji, H. 2012. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29.
- Salim, R., Cahyana, B.T., Prabawa, I.D., Hamdi, S. 2019. Potensi bambu untuk pemanfaatan sebagai bahan bakar arang dengan metode pengarangan retort tungku drum. *Indonesian Journal of Industrial Research*. 11(2): 230-241.
- Sanni, A.L., Nurjannah, I. 2024. Pengaruh variasi komposisi bahan baku sekam padi, bonggol jagung dan perekat tapioka terhadap kualitas dan performa pembakaran briket biomassa. *Jurnal Teknik Mesin*. 13(02): 83-90.

- Saputra, B., Tambunan, K.G.A., Suri, I.F., Febryano, I.G., Iswandaru, D., Hidayat, W. 2022. Effects of torrefaction temperature on the characteristics of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian*. 11(2): 339.
- Sidabutar, V. 2018. Kajian peningkatan potensi ekspor pelet kayu Indonesia sebagai sumber energi biomassa yang terbarukan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 12(1): 99-116.
- Standar Nasional Indonesia. 2018. *SNI 8675-2018 Pelet Biomassa untuk Energi*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Sudarmanta, B., Murtadji, D.B., dan Wulandari, D.F. 2009. Karakterisasi gasifikasi biomassa sekam padi menggunakan reaktor downdraft dengan dua tingkat aliran udara. *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*. 8: 11-14.
- Suganal, Kurnia, G. 2019. Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 1(5): 31-48.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Pengaruh torefaksi dengan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan *electric furnace* terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*. 8(1): 65-76.
- Sultana, A., Kumar, A. 2012. Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. *Biomass and Bioenergy*. 39: 344-355.
- 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.
- Syafitri, R., Putri, E. 2022. Masalah global: *Global warming* dan hubungannya dengan penggunaan bahan bakar fosil. *Jurnal Bakti Sosial*. 1(1): 14-22.
- Septiadi, D., Nanlohy, P., Souissa, M., Rumlawang, F.Y. 2009. Proyeksi potensi energi surya sebagai energi terbarukan (studi wilayah Ambon dan sekitarnya). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. 10(1): 22-28.
- Tambunan, K.G.A., Saputra, B., Suri, I.F., Febryano, I.G., Bintoro, A., Hidayat, W. 2023. Perubahan sifat fisis dan mekanis pelet bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinaceae*) setelah perlakuan torefaksi. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 17(1): 11-20.

- Usino, D.O., Ylittervo, P., Moreno, A., Sipponen, M.H., Richards, T. 2021. Primary interactions of biomass components during fast pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 159(7): 105297.
- Valverde, J.C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. *Color Research & Application*. 39(5): 519-529.
- Wang, Z., Zhu, H., Sun, B., Shu, X. 2018. A novel multi-baffle counter-flow reactor for biomass gasification. *Energy Conversion and Management*. 165: 591-600.
- Wati, D.A.R., Supriyono, T. 2025. Analisis kandungan *volatile matter* pada briket batok kelapa dengan metode gravimetri untuk optimasi kualitas pembakaran. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 1(1): 37-44.
- Wibowo, S., Pari, G. 2022. Pengaruh penambahan tepung tapioka pada karakteristik pelet kayu dari limbah cabang kayu Jati Perhutani Plus (JPP). *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 16(1): 50-63.
- Widyasari, T., Hartono, S., Irham, I. 2015. Peremajaan optimal tanaman karet di PT Perkebunan Nusantara IX. *Jurnal Penelitian Karet*. 33(1): 47-56.
- Wijaya, B.A., Hidayat, W., Riniarti, M., Saputra, B., Rani, I.T., Kim, S., Park, B. 2025. Properties of Indonesian short rotation coppice (*Calliandra calothyrsus*) biochar as a coal substitute in the steelmaking process. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 1-15.
- Wijaya, B.A., Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Yoo, J., Park, B. 2025. Field evaluation of biochar application on the early growth of *Falcataria moluccana*: Effects of pyrolysis temperatures and biochar application rates. *Jurnal Sylva Lestari*. 13(1), 248-263.
- Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(2): 104-111.
- Zabihian, F., Fung, W.W.S., dan Hassim, M.H. 2020. A review on the valorization of rubber wood biomass into value-added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 10(4):1135-1158.
- Zhai, M., Wang, X., Zhang, Y., Dong, P., Xiao, Y. 2018. Experimental study of a multi-baffled bed biomass gasifier: Influence of airstagings on tar production. *Energy*. 162: 277-285.

- Zhang, H., Gao, Z., Ao, W., Li, J., Liu, G., Fu, J., Dai, J. 2017. Microwave-assisted pyrolysis of textile dyeing sludge using different additives. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 127: 140-149.
- Zustika, S., Akbar, H. 2025. Penggunaan berbagai jenis dan dosis biochar terhadap emisi karbondioksida, nitrat dan mikroorganisme pada tanah. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 12(1): 89-96.