

**GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) SEBAGAI
SUMBER ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT*
*GASIFIER***

(Skripsi)

Oleh

**WANA PUTRI ANASTASYA HUTASOIT
2214151114**



**JURUSAN KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER*

Oleh

Wana Putri Anastasya Hutasoit

Meningkatnya kebutuhan energi global, disertai dengan menurunnya cadangan bahan bakar fosil, mendorong pengembangan energi terbarukan berbasis biomassa. Kayu karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan salah satu sumber biomassa potensial karena ketersediaannya yang melimpah dari kegiatan peremajaan kebun rakyat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik energi pelet kayu karet sebagai bahan bakar biomassa, menganalisis komposisi gas sintesis (*syngas*) dan nilai kalor rendah (*Lower Heating Value*), serta karakteristik *ash* (*by-product* gasifikasi) menggunakan *gasifier* tipe *downdraft*. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dengan menggunakan 20 kg pelet kayu karet sebagai bahan baku. Prosedur gasifikasi berlangsung melalui empat tahapan utama, yaitu pengeringan, pirolisis, pembakaran, dan reduksi yang dilakukan di dalam sistem *gasifier* tipe *downdraft*. Analisis *syngas* dilakukan menggunakan *portable infrared syngas analyzer* (Gasboard G3100-P) untuk menentukan konsentrasi CO, CO₂, CH₄, H₂, dan O₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata komposisi *syngas* yang dihasilkan adalah 17,98% CO, 8,58% CO₂, 1,57% CH₄, 10,04% H₂, dan 1,78% O₂. Nilai kalor rata-rata (LHV) sebesar 725,81 kcal/m³ dengan kisaran 690–775 kcal/m³. Hasil analisis proksimat menunjukkan kadar air 10,93%, zat terbang 74,37%, kadar abu 8,60%, dan karbon terikat 6,20% pada biomassa pelet, sedangkan pada *ash* (*by-product*) diperoleh kadar air 9,58%, zat terbang 14,42%, kadar abu 71,61%, dan karbon terikat 4,37%. Komposisi *syngas* yang dihasilkan berada dalam kisaran ideal untuk *gasifier* tipe *downdraft*, sehingga menunjukkan bahwa pelet kayu karet memiliki potensi yang tinggi sebagai bahan bakar energi terbarukan berbasis biomassa.

Kata kunci: biomassa, gasifikasi, kayu karet, *syngas*, *downdraft gasifier*.

ABSTRACT

GASIFICATION OF RUBBER WOOD PELLETS (*Hevea brasiliensis*) AS A RENEWABLE ENERGY SOURCE USING DOWNDRAFT GASIFIER

By

Wana Putri Anastasya Hutasoit

*The increasing global energy demand, coupled with declining fossil fuel reserves, is driving the development of biomass-based renewable energy. Rubber wood (*Hevea brasiliensis*) is a potential biomass source due to its abundant availability from the rejuvenation of community gardens. This study aims to analyze the energy characteristics of rubber wood pellets as biomass fuel, analyze the composition of synthesis gas (syngas) and lower heating value (LHV), and the characteristics of ash (residue from the gasification process) using a downdraft gasifier. The study was conducted at the Forest Products Technology Laboratory, Faculty of Agriculture, University of Lampung, using 20 kg of rubberwood pellets as the raw material. The gasification procedure progresses through four fundamental stages, including drying, pyrolysis, combustion, and reduction, which are conducted within a downdraft gasifier system. Syngas analysis was performed using a portable infrared syngas analyzer (Gasboard G3100-P) to determine the concentrations of CO, CO₂, CH₄, H₂, and O₂. The results showed that the average composition of the syngas produced was 17.98% CO, 8.58% CO₂, 1.57% CH₄, 10.04% H₂, and 1.78% O₂. The average calorific value (LHV) was 725.81 kcal/m³ with a range of 690–775 kcal/m³. The proximate analysis results showed a moisture content of 10.93%, volatile matter 74.37%, ash content 8.60%, and fixed carbon of 6.20% in the pellet biomass, while the ash (by-product) had a moisture content of 9.58%, volatile matter 14.42%, ash content 71.61%, and fixed carbon 4.37%. The composition of the syngas produced was within the ideal range for a downdraft, indicating that rubberwood pellets have high potential as a biomass-based renewable energy fuel.*

Keywords: biomass, gasification, rubber wood, syngas, downdraft gasifier.

**GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) SEBAGAI
SUMBER ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT*
*GASIFIER***

Oleh

WANA PUTRI ANASTASYA HUTASOIT

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**JURUSAN KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

Judul : **GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN DOWNDRAFT GASIFIER**

Nama Mahasiswa : Wana Putri Anastasya Hutasoit

Nomor Pokok Mahasiswa : 2214151114

Jurusan : Kehutanan

Fakultas : Pertanian

Tanggal Pengajuan : 26 Januari 2026



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

Bugae Park

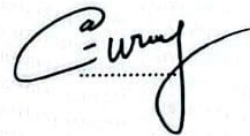
2. Ketua Jurusan Kehutanan

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

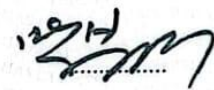
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

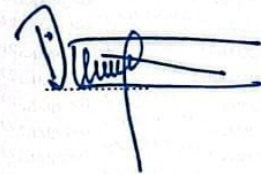
Ketua : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Sekretaris : Bugae Park



Anggota : Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 20 Januari 2026

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Wana Putri Anastasya Hutasoit
NPM : 2214151114

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

"GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER*"

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

Bandar Lampung, 26 Januari 2026
Yang menyatakan



Wana Putri Anastasya Hutasoit
NPM 2214151114

RIWAYAT HIDUP



Wana Putri Anastasya Hutasoit (penulis) yang biasa disapa Wana, dilahirkan di Medan, 12 September 2005. Penulis sebagai anak pertama dari lima bersaudara yang merupakan anak pasangan dari Ayah Antony Hutasoit dan Ibu Eva Mariance Sitanggang. Penulis menempuh pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di TK Harapan Bangsa tahun 2009-2010, Sekolah Dasar (SD) di SDN 117059 Silaban Hutasoit tahun 2010-2016, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 3 Lintongnihuta 2016-2019, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Lintongnihuta tahun 2019-2022. Tahun 2022 penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam unit kemahasiswaan dan organisasi di dalam kampus maupun di luar kampus. Penulis terdaftar sebagai Ketua Tim Musik UKM Kristen Universitas Lampung, mengikuti organisasi internal dalam kampus yaitu Himpunan Mahasiswa Kehutanan (Himasyilva) sebagai Anggota Bidang Pengembangan Kewirausahaan selama satu periode (tahun 2024) dan penulis juga aktif di organisasi eksternal kampus yaitu Naposo HKBP (NHKBP) Kedaton sebagai anggota Tim Musik tahun 2023-2026.

Dalam upaya mengembangkan potensi diri di luar kegiatan perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan kompetisi, seminar ilmiah, dan forum akademik di tingkat universitas, fakultas, daerah, nasional, hingga internasional. Penulis memiliki pengalaman berprestasi dalam berbagai perlombaan non-Belmawa perorangan, antara lain Juara 1 National Glorious Competition (2023), Juara 2 National Art Competition (2024), Juara 1 Voice of Faith Competition tingkat regional (2025), serta Juara 2 Pekan Seni Mahasiswa Universitas Lampung

(2025). Selain itu, penulis juga meraih Juara 3 Governance Festival Vol. III (2023) dan Juara 3 Coop Education Festival tingkat nasional (2024). Penulis turut berpartisipasi sebagai finalis dalam berbagai kompetisi lainnya, baik di tingkat universitas maupun regional.

Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti penulis yaitu Magang/Internship di Stasiun Penelitian Way Canguk (SPWC), Taman Nasional Bukit Barisan Selatan (TNBBS) selama 30 hari. Pada tahun 2025, penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Kota Batu, Kecamatan Pubian, Kabupaten Lampung Tengah selama 40 hari. Penulis juga mengikuti kegiatan praktik umum (PU) di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM) yaitu di KHDTK Wanagama, Gunung Kidul, Yogyakarta dan KHDTK Getas, Blora, Jawa Tengah pada bulan Juli 2025 - Agustus 2025. Sebagai bagian dari keterlibatan akademik, penulis dipercaya sebagai Asisten Dosen pada empat mata kuliah, yaitu Inventarisasi Flora dan Fauna (2023 & 2025), Manajemen Hidupan Liar (2025), Pemanenan Hasil Hutan (2025), serta Bahasa Inggris (2025).

Sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan keilmuan, penulis telah mempublikasikan artikel ilmiah pada salah satu jurnal internasional (2025), yaitu *Journal Forest & Nature*, dengan judul “*Thermochemical Conversion of Rubber Wood Pellets via Downdraft Gasification: Syngas Composition, Heating Value Trends, and By-Product Characterization*”. Berkat dukungan berbagai pihak serta proses akademik yang dijalani dengan tekun, penulis akhirnya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Gasifikasi Pelet Kayu Karet (Hevea brasiliensis) Sebagai Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Downdraft Gasifier*”. Penyusunan skripsi ini menjadi penutup dari rangkaian proses pendidikan sarjana yang ditempuh penulis di Jurusan Kehutanan.

*Kupersembahkan karya tulis ini untuk keluargaku tersayang
Ayah Antony Hutasoit, Ibu Eva Mariance Sitanggang, dan Adik- adik Sola
Gratia Hutasoit, Morina Hutasoit, Tommy Lahagu Hutasoit, Happy Valentine
Hutasoit*

“Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan
kepadaku”
Filipi 4:13

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Gasifikasi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) Sebagai Sumber Energi Terbarukan Menggunakan *Downdraft Gasifier*” dapat diselesaikan dengan baik sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan, petunjuk, serta dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan rasa hormat dan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S. Hut., M. P., IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan sebagai dosen penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama serta yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Bugae Park selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku pembimbing akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan nasihat selama perkuliahan.

7. Segenap dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan dan Staff administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
8. Ayahku tersayang, Bapak Antony Hutasoit yang telah memberikan dukungan, doa, nasihat, kasih sayang tak terhingga, serta tanggung jawab sebagai seorang Ayah yang tulus kepada penulis. Terima kasih atas perjuangan serta pengorbanan yang memotivasi penulis hingga dapat bertahan sampai saat ini. Terimakasih atas segala bentuk cinta yang telah diberikan.
9. Ibuku Eva Mariance Sitanggang, terima kasih telah mendidik, sabar, memberikan doa, nasihat, kasih sayang, serta dukungan dalam setiap keputusan penulis. Terima kasih telah menjadi contoh seseorang yang kuat dalam menjalani hidup sehingga penulis terus terdorong untuk berjuang dan kuat dalam melewati banyaknya hambatan dan juga dapat menyelesaikan skripsi dengan maksimal.
10. Adik – adik penulis, Sola Gratia Hutasoit, Morina Hutasoit, Tommy Lahagu Hutasoit dan Happy Valentine Hutasoit yang telah memberikan motivasi, semangat, dan dukungan tanpa henti.
11. Orang terdekat penulis, Yosafhat Christ Hasian Hasibuan, S. PWK. yang telah membantu dalam proses penyusunan skripsi ini dan memberikan dukungan yang sangat berarti.
12. Teman-teman, sahabat, dan seluruh Kehutanan Angkatan 2022 (Rexterion) yang telah kebersamaan serta membantu dalam perkuliahan.
13. Serta seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis yang telah banyak membantu penulis selama melakukan perkuliahan dan proses skripsi ini.

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

Bandar Lampung, Januari 2026

Wana Putri Anastasya Hutasoit

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	3
1.4. Kerangka Pemikiran	4
1.5. Hipotesis	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Biomassa	7
2.2. Kayu Karet	8
2.3. Pelet Kayu Karet	10
2.4. Teknologi Gasifikasi	12
2.5. <i>Gasifier</i>	13
2.6. <i>Gasifier Tipe Downdraft</i>	15
2.7. <i>Syngas</i>	16
2.8. <i>Biochar</i>	17
III. METODE PENELITIAN	20
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	20
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	20
3.3. Metode Pengambilan Data	20
3.3.1. Persiapan Sampel.....	20
3.3.2. Proses Gasifikasi.....	21

3.4. Analisis Parameter.....	22
3.4.1. Analisis <i>Syngas</i>	22
3.4.2. Analisis <i>Lower Heating Value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	24
3.4.3. Analisis Proksimat	24
3.5. Analisis Data	26
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1. Analisis <i>Syngas</i>	28
4.1.1. Karbon Monoksida (CO)	29
4.1.2. Karbon Dioksida (CO ₂)	30
4.1.3. Metana (CH ₄).....	32
4.1.4. Hidrogen (H ₂)	33
4.1.5. Oksigen (O ₂)	34
4.1.6. <i>Lower Heating Value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	35
4.2. Analisis Proksimat Pelet Kayu Karet dan <i>Ash</i> (<i>by-product</i>) Gasifikasi	37
4.2.1. Kadar Air	38
4.2.2. Kadar Zat Terbang	39
4.2.3. Kadar Abu.....	40
4.2.4. Karbon Terikat.....	41
4.3. Implikasi <i>Syngas</i> sebagai Produk Utama Hasil Gasifikasi Pelet Kayu Karet (<i>Hevea brasiliensis</i>).....	42
V. KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1. Kesimpulan.....	44
5.2. Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Potensi biomassa di Indonesia.....	8
Tabel 2. Jenis – jenis proses konversi termokimiawi.....	12
Tabel 3. Produksi kandungan tar pada alat gasifikasi	15
Tabel 4. Komposisi <i>syngas</i> ideal dari <i>downdraft gasifier</i>	17
Tabel 5. Perbedaan antara arang, <i>biochar</i> , dan karbon aktif.....	19
Tabel 6. Komposisi <i>syngas</i> hasil gasifikasi pelet kayu karet	28
Tabel 7. Nilai <i>Low Heating Value</i> (LHV) dan temperatur	36
Tabel 8. Nilai proksimat pelet kayu karet dan <i>by-product</i>	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian	5
Gambar 2. Pohon karet (<i>Hevea brasiliensis</i>)	10
Gambar 3. Alur pembuatan pelet biomassa.....	11
Gambar 4. Berbagai tipe <i>gasifier</i>	14
Gambar 5. Alur gasifikasi pada <i>downdraft gasifier</i>	16
Gambar 6. <i>Bio-charcoal</i> atau arang hasil pirolisis	18
Gambar 7. Pelet kayu karet	21
Gambar 8. Generator	21
Gambar 9. Pelet kayu karet di dalam <i>feedstock gasifier</i>	21
Gambar 10. Corong untuk menyalakan api pada reaktor.....	22
Gambar 11. Tampilan layar reaktor.....	22
Gambar 12. Katup penghubung	23
Gambar 13. <i>Conditioning and Filter Syngas Analyzer</i>	23
Gambar 14. <i>Portable Syngas Analyzer</i>	23
Gambar 15. <i>Software Gas Analyzer V2.0.12.</i>	24
Gambar 16. Persentase kadar CO.....	30
Gambar 17. Persentase kadar CO ₂	31
Gambar 18. Persentase kadar CH ₄	32
Gambar 19. Persentase kadar H ₂	33
Gambar 20. Persentase kadar O ₂	35
Gambar 21. Grafik perubahan nilai <i>Lower Heating Value</i> (LHV) selama proses gasifikasi	36
Gambar 22. Persentase kadar air	39
Gambar 23. Persentase kadar zat terbang	40
Gambar 24. Persentase kadar abu	41
Gambar 25. Persentase karbon tetap	42

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era globalisasi dan teknologi yang semakin canggih, meningkatnya kebutuhan energi nasional dan ketergantungan Indonesia terhadap energi fosil masih sangat tinggi. Sementara itu, cadangan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam kian menipis, menyebabkan harga energi menjadi tidak stabil dan cenderung meningkat (Afin dan Kiono, 2021). Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), cadangan minyak bumi Indonesia diperkirakan akan habis dalam waktu kurang dari 10 tahun jika tidak ditemukan sumber baru, sedangkan cadangan gas alam dan batu bara diperkirakan hanya mampu bertahan masing-masing selama 20 hingga 60 tahun ke depan. Kondisi ini menyebabkan harga energi menjadi tidak stabil dan cenderung meningkat dari tahun ke tahun, baik di tingkat nasional maupun global (Waruwu, 2023). Untuk mencapai target Indonesia dalam mewujudkan komposisi energi campuran sebesar 23 persen pada tahun 2025 melalui *co-firing*, diperlukan peningkatan signifikan dalam ketersediaan sumber energi terbarukan (Hidayat *et al.*, 2024).

Di tengah kebutuhan untuk mencari solusi energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, potensi biomassa dari limbah kehutanan dan perkebunan menjadi salah satu alternatif yang dapat dikembangkan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2023 menyebutkan bahwa Indonesia memiliki potensi energi biomassa yang sangat besar mencapai sekitar 146 juta ton per tahun, setara 56,97 GW listrik, terutama dari sisa hasil pertanian dan kehutanan di wilayah Sumatra dan Kalimantan. Salah satu jenis biomassa yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia adalah kayu karet. Indonesia memiliki wilayah perkebunan karet mencapai 3,54 juta ha yang terdiri dari 7%

perkebunan milik negara, 85% perkebunan karet merupakan milik rakyat dan 8% perkebunan besar swasta (Badan Pusat Statistik, 2023).

Pemanfaatan biomassa biasanya dilakukan dengan cara pembakaran secara langsung sehingga menghasilkan kalor. Namun pembakaran biomassa secara langsung memiliki kelemahan yakni kurang ramah lingkungan karena asap yang ditimbulkan. Salah satu teknologi yang saat ini berkembang untuk mengubah biomassa menjadi energi adalah gasifikasi biomassa. Hariyanto (2022), menyebutkan bahwa gasifikasi adalah cara paling umum untuk mengubah energi kuat menjadi gas yang mudah terbakar (CO , CH_4 , H_2) melalui siklus pembakaran dengan pasokan udara terbatas, yang berkisar antara 20% dan 40% udara stoikiometri.

Gasifikasi merupakan proses konversi energi dari bahan padat (biomassa) menjadi *syngas* (gas sintesa) yang nantinya dapat digunakan sebagai bahan bakar (Suhendi dkk., 2017). Bahan padat yang dimaksud adalah bahan bakar padat misalnya, biomassa, batubara, dan arang yang mengandung karbon (C), sedangkan gas yang dimaksud adalah gas-gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi seperti CO , H_2 , dan CH_4 . Melalui gasifikasi, dapat dikonversi hampir semua bahan organik kering menjadi bahan bakar, sehingga dapat menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber bahan bakar. Bahan baku untuk proses gasifikasi dapat berupa limbah biomassa, yaitu potongan kayu, tempurung kelapa, sekam padi maupun limbah pertanian lainnya (Pratiwi, 2020).

Teknologi gasifikasi memiliki keunggulan karena efisien, ramah lingkungan, dan dapat memanfaatkan berbagai jenis biomassa lokal. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa kayu karet (*Hevea brasiliensis*) memiliki karakteristik unggul sebagai bahan baku gasifikasi. Studi oleh Isgiyarta *et al.* (2022) membuktikan bahwa kayu karet mampu menghasilkan syngas dengan komposisi gas bakar yang baik, seperti CO dan H_2 , serta kadar tar yang relatif rendah, sehingga layak diaplikasikan dalam pembangkit listrik skala kecil. Hal serupa juga ditemukan oleh Siddique *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa kayu karet memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan kestabilan termal yang mendukung, menjadikannya bahan baku yang potensial untuk teknologi konversi energi berkelanjutan.

Namun, penelitian mengenai kayu karet sebagai bahan baku gasifikasi masih relatif terbatas. Menurut Kasawapat *et al.* (2024), kayu karet memiliki kandungan lignoselulosa tinggi yang mendukung proses gasifikasi serta nilai kalor yang memadai. Hal ini menunjukkan bahwa kayu karet sebenarnya berpotensi besar sebagai alternatif bahan baku energi, terutama di daerah penghasil karet seperti Lampung. Menurut data Badan Pusat Statistik (2023), Lampung merupakan salah satu dari 10 daerah penghasil karet terbesar di Indonesia. Produksi karet Lampung tahun 2018 mencapai 192.133 ton dengan luas areal 172.371 ha serta kabupaten penghasil karet terbanyak adalah Way Kanan, Lampung Utara, Tulang Bawang, Mesuji dan Tulang Bawang Barat (Hidayati dkk., 2020).

Berdasarkan ketersediaan biomassa yang berlimpah, namun pemanfaatan yang belum optimal, terutama untuk kayu karet, maka dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui sejauh mana potensi bahan ini dalam proses gasifikasi. Melalui uraian latar belakang tersebut, penelitian mengenai potensi kayu karet sebagai bahan baku gasifikasi biomassa menjadi sangat relevan untuk dikembangkan, terutama dalam konteks pemanfaatan pelet kayu karet hasil limbah tebangan pohon karet di Provinsi Lampung.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) sebagai bahan baku gasifikasi biomassa menggunakan *downdraft gasifier*.
2. Menganalisis komposisi gas sintesis (*syngas*) dan nilai kalor atau LHV (*Lower Heating Value*) yang dihasilkan dari gasifikasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) menggunakan *downdraft gasifier*.
3. Menganalisis karakteristik energi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan *biochar* pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) yang dihasilkan sebagai produk samping dari proses gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier*.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

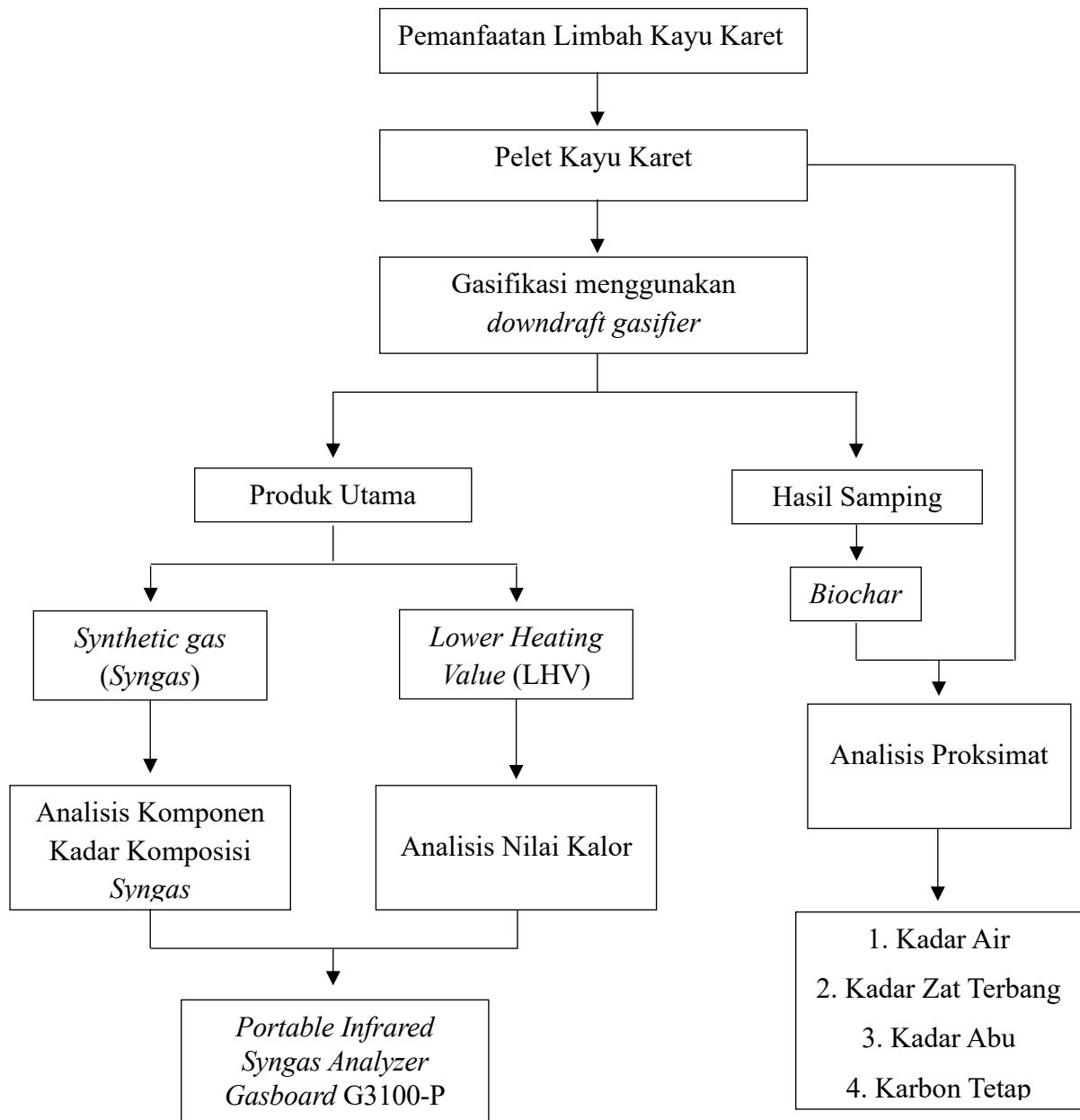
1. Memberikan informasi mengenai karakteristik pelet kayu karet dalam proses gasifikasi biomassa.
2. Menyediakan data mengenai nilai dari komposisi *syngas* dan nilai kalor atau *Lower Heating Value* (LHV) hasil gasifikasi pelet kayu karet menggunakan *downdraft gasifier*.
3. Menjadi dasar dalam mengevaluasi karakteristik termal dan kualitas pelet kayu karet serta *biochar* sebagai produk samping gasifikasi pelet kayu karet.

1.4. Kerangka Pemikiran

Dalam upaya pengembangan energi terbarukan, biomassa seperti kayu karet (*Hevea brasiliensis*) menjadi salah satu bahan yang potensial untuk dikonversi menjadi energi melalui proses gasifikasi. Kayu karet, terutama hasil peremajaan perkebunan, menghasilkan limbah dalam jumlah besar yang belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu bentuk pemanfaatan limbah tersebut adalah dengan mengolahnya menjadi pelet, yang kemudian digunakan sebagai bahan baku dalam proses gasifikasi. Proses ini mengubah biomassa padat menjadi gas sintesis (*syngas*) yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan energi, seperti bahan bakar pembangkit listrik atau bahan baku industri kimia. Penelitian oleh Syamsudin dkk. (2022), menunjukkan bahwa pelet kayu karet memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan berpotensi besar sebagai sumber energi alternatif.

Gasifikasi pelet kayu karet dilakukan dengan menggunakan reaktor *downdraft gasifier*, yang mampu menghasilkan gas sintesis sebagai produk utama. *Syngas* ini terdiri dari komponen utama seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), hidrogen (H₂), dan oksigen (O₂). Komposisi gas tersebut sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa dan parameter operasional gasifikasi. Dalam penelitian oleh Astuti *et al.* (2021), gasifikasi pelet dari biomassa menghasilkan *syngas* dengan kandungan CO sebesar 21,3%, H₂ sebesar 15,6%, dan CH₄ sebesar 2,8%, menunjukkan bahwa proses ini efektif dalam mengubah bahan organik menjadi energi gas. Dengan demikian, diagram alir yang disusun menunjukkan keterkaitan antara pemanfaatan limbah kayu karet, proses konversi melalui gasifikasi, hingga analisis komposisi gas hasilnya yang menjadi

fokus utama dalam penelitian ini. Kerangka pemikiran pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian

1.5. Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Serbuk kayu karet memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung sebagai bahan baku dalam proses pembuatan pelet untuk gasifikasi biomassa.

2. Pelet kayu karet menghasilkan *syngas* dengan kandungan utama berupa CO, CO₂, CH₄, H₂, dan O₂ dalam proporsi yang kompetitif dibandingkan biomassa lain.
3. Terdapat hubungan signifikan antara variasi massa umpan pelet kayu karet dengan kadar masing-masing komponen *syngas* yang dihasilkan dalam proses gasifikasi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa

Biomassa adalah bahan atau material organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk maupun buangan (Parinduri dan Taufik, 2020). Menurut data Kementerian ESDM (2023), potensi biomassa di Indonesia yang bisa digunakan sebagai sumber energi jumlahnya sangat melimpah, potensi biomassa Indonesia sebesar 146,7 juta ton per tahun. Sementara potensi biomassa yang berasal dari sampah diperkirakan sebanyak 53,7 juta ton. Limbah yang berasal dari hewan maupun tumbuhan semuanya potensial untuk dimanfaatkan dan dikembangkan. Tanaman pangan dan perkebunan menghasilkan limbah yang cukup besar yang dapat dipergunakan untuk keperluan lain seperti bahan bakar nabati.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari 17.504 pulau yang terbagi dalam 34 wilayah administrasi provinsi. Indonesia merupakan negara tropis yang dilintasi garis khatulistiwa dengan luas lahan pertanian 8 juta hektar dan hutan 86 juta hektar sehingga memiliki potensi alam yang sangat besar. Berdasarkan Peraturan Presiden nomor 112 tahun 2022 tentang percepatan pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk penyediaan tenaga listrik, biomassa menjadi salah satu sumber EBT yang memiliki potensi yang besar untuk dimanfaatkan. Salah satunya yaitu sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) dan implementasi *co-firing* di PLTU. Sumber daya biomassa meliputi kelapa sawit, tebu, karet, kelapa, padi, jagung, singkong, kayu, kotoran ternak, dan sampah kota. Potensi bioenergi Indonesia sangat besar sebagai sumber energi masa depan.

Bioenergi dapat menggantikan energi fosil dalam hampir semua bidang, seperti transportasi, ketenagalistrikan, industri, dan rumah tangga. Berdasarkan penelitian Primadita *et al.* (2020), pemanfaatan bioenergi terutama produk

biomassa dapat menjadi sumber energi yang lebih baik untuk meningkatkan rasio elektrifikasi dan diproyeksikan dapat membantu meningkatkan ketahanan energi nasional. Energi biomassa yang tersedia di Indonesia cukup banyak, dan bisa dihasilkan dari beragam sumber, mulai dari kayu, limbah kebun kelapa sawit, padi, jagung, singkong, dan tebu (Trihusodo, 2022). Berdasarkan penelitian Saputra dkk. (2022), Indonesia berpotensi menghasilkan biomassa hingga 24,12 ribu MW tanpa karbon seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Potensi biomassa di Indonesia

No	Provinsi	Potensi Biomassa (MW)	Potensi Biogas (MW)	Total (MW)
1	Riau	4.157,4	37,7	4.195,1
2	Jawa Timur	2.851,3	569,6	3.420,9
3	Sumatera Utara	2.796,1	115,5	2.911,6
4	Jawa Barat	1.979,8	574,3	2.554,1
5	Jawa Tengah	1.885,1	384,4	2.232,5
6	Sumatera Selatan	2.061,4	71,2	2.132,6
7	Jambi	1.821	18,9	1.839,9
8	Kalimantan Tengah	1.486,7	12,2	1.498,9
9	Lampung	1.407,6	84,5	1.492,1
10	Kalimantan Barat	1.279,3	28,9	1.308,2
11	Kalimantan Selatan	1.266,3	23,6	1.289,9
12	Aceh	1.136,6	37,7	1.174,3

2.2. Kayu Karet

Dalam dunia internasional, karet disebut dengan sebutan *rubber wood* dan merupakan tanaman asli dari daerah Amazon, Brasil yang pada awalnya dikembangkan di India pada akhir abad ke-18. Namun pengembangannya tidak berhasil dan akhirnya dibawa hingga ke Asia Tenggara dan masuk ke Indonesia

(Suryanarayanan *et al.*, 2023). Studi Koryati *et al.* (2020), menyebutkan bahwa tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan salah satu jenis tanaman perkebunan yang banyak dibudidayakan di Indonesia, terutama untuk diambil lateksnya sebagai bahan baku industri karet. Namun, setelah masa produktifnya berakhir, batang pohon karet menghasilkan limbah biomassa yang potensial untuk dimanfaatkan.

Klasifikasi pohon karet sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Subdivisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledonae
Ordo	: Euphorbiales
Famili	: Euphorbiaceae
Genus	: <i>Hevea</i>
Spesies	: <i>Hevea brasiliensis</i> muell. Arg.

Menurut Ismanto dan Saputro (2020), kayu karet (Gambar 2) memiliki kandungan pati, selulosa, dan lignin yang cukup tinggi, yang menjadikannya cocok digunakan dalam berbagai aplikasi pengolahan hasil hutan, termasuk gasifikasi, pulp, dan produk kayu olahan lainnya. Hal ini sesuai dengan penelitian Safitri dan Susi, (2023) yang menyebutkan bahwa dari hasil analisis komponen kimia diperoleh nilai rata-rata zat ekstraktif yang larut dalam air dingin 3,86 %. Zat ekstraktif yang larut dalam air panas 4,21 %. Zat ekstraktif yang larut dalam NaOH 1% 14,82 % dan zat ekstraktif yang larut dalam *ethanol-benzena* 2,93 %. Kadar holoselulosa 75,06 %. Kadar selulosa dan α -selulosa masing-masing 43,98 % dan 37,71 % serta kadar lignin 26,39 %.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Vachlepi (2020), potensi kayu karet sangat besar akibat dari tingginya jumlah tanaman karet tua yang harus diremajakan terutama di perkebunan rakyat. Menurut data dari Direktorat Jenderal Perkebunan, luas areal karet mencapai 3,46 juta ha dan diestimasikan menjadi 3,82 juta ha pada tahun 2022. Luasan areal perkebunan karet yang besar ini akan menghasilkan limbah yang besar pula karena kegiatan peremajaan tanaman karet yang rutin dilakukan setiap 25 - 30 tahun. Kegiatan peremajaan merupakan

perlakuan penanaman kembali tanaman karet yang bertujuan untuk mengganti tanaman yang sudah tidak produktif dan tidak menghasilkan getah (Ridjayanti dkk., 2023).



Gambar 2. Pohon karet (*Hevea brasiliensis*)

Kayu karet di Indonesia memiliki ketersediaan yang melimpah. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Perkebunan tahun 2023-2025, Indonesia merupakan negara dengan perkebunan karet paling luas di dunia. Data pada tahun 2023, luas areal perkebunan sawit di Indonesia adalah 3.152.745 ha yang terdiri dari tanaman menghasilkan (TM) 72,30%; tanaman belum menghasilkan (TBM) 18,72%; dan tanaman tidak menghasilkan (TTM) 8,99%. Kayu karet yang masuk kategori TTM ini bisa dimanfaatkan lebih lanjut salah satu contohnya untuk dibuat menjadi bahan bakar biopelet. Selain kayu karet kategori TTM, biopelet juga dapat diproduksi dari limbah batang karet (Direktorat Jenderal Perkebunan., 2025).

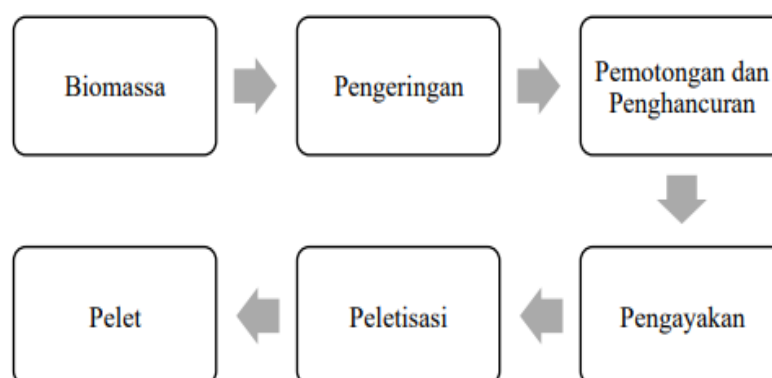
2.3. Pelet Kayu Karet

Pelet adalah bahan pakan yang dicampur, dikompresi dan dicetak dengan mengeluarkannya secara mekanis dari diesel. Pelet kayu karet memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian oleh Syamsudin dkk. (2022), menunjukkan bahwa pelet yang dibuat dari campuran 75% serbuk kayu karet dan 25% serbuk pelepah kelapa sawit memiliki kerapatan $0,49 \text{ g/cm}^3$, kadar air 5,56%, kadar zat terbang 77,70%, karbon terikat 11,69%, kadar abu

1,81%, dan nilai kalor 4.068 kal/g. Nilai-nilai ini memenuhi standar kualitas pelet kayu menurut *Pellet Fuel Institute* (PFI) di Amerika Serikat.

Menurut penelitian Suwito dkk. (2020), kualitas pellet yang baik ditandai dengan memiliki permukaan yang halus dengan tanpa retakan saat keluar dari pellet press. Hal ini sejalan dengan penelitian Brayen dkk. (2017), yang menyatakan bahwa kadar air dalam bahan baku sangat mempengaruhi kualitas pelet yang dihasilkan. Kadar air yang lebih rendah dapat meningkatkan nilai kalor pada biopellet. Kadar air yang tinggi dapat menyebabkan pelet mudah hancur dan nilai kalor yang rendah. Oleh karena itu, pengendalian kadar air sangat penting dalam proses pembuatan pelet kayu karet.

Pemanfaatan limbah kayu karet sebagai bahan baku pelet biomassa dapat meningkatkan nilai tambah dan mengurangi limbah industri. Penelitian oleh Prayitno (2020), menunjukkan bahwa pelet yang dibuat dari kayu karet tidak produktif memiliki kadar air sebesar 7,28%, kadar abu 1,60%, nilai kalor 4.142 kal/g, dan kerapatan 0,9 g/cm³. Penelitian Tambunan dkk. (2023), dalam studi perbandingannya menyatakan, pelet kayu karet menunjukkan nilai kalor sebesar 4.142 kal/g, yang lebih tinggi dibandingkan dengan pelet kayu akasia (4.003 kal/g) dan tarap (3.404 kal/g), namun lebih rendah dibandingkan dengan pelet kayu ketapang (4.555 kal/g) dan jabon (4.404 kal/g). Hal ini menunjukkan bahwa kayu karet memiliki potensi yang baik sebagai bahan baku pelet, meskipun masih dapat ditingkatkan melalui proses seperti torefaksi atau pencampuran dengan bahan lain (Bazenet dkk., 2021). Pembuatan pelet melewati beberapa fase (Gambar 3) yaitu pemilahan, pengeringan, penimbangan, penghancuran, pengayakan, dan peletisasi.



Gambar 3. Alur pembuatan pelet biomassa

2.4. Teknologi Gasifikasi

Gasifikasi biomassa merupakan proses konversi bahan selulosa dalam suatu reaktor gasifikasi (*gasifier*) menjadi bahan bakar (Aprilia dan Siregar, 2023). Gasifikasi biomassa membutuhkan media gasifikasi untuk membentuk sintesis gas (CO dan H₂) yang dapat diproses lebih lanjut menjadi bahan kimia dan bahan bakar nabati yang lebih bernilai. Media gasifikasi dapat berupa udara, uap, oksigen, atau SCW (*Supercritical Water Gasification*). Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk konversi biomassa menjadi produk, seperti konversi termal, konversi termokimia, konversi biokimia, dan konversi kimiawi. Penelitian oleh Mishra *et al.* (2021) menyebutkan bahwa konversi termokimia mengacu pada penguraian biomassa dalam atmosfer anoksigenik atau oksigenik pada kisaran suhu 503 hingga 1673, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis – jenis proses konversi termokimiawi

Jenis	Temperatur (K)	Tekanan (MPa)	Produk Utama
Torefaksi	503-573	0,1	Bahan bakar padat
Likuifaksi	523-603	5-20	Minyak, Gas
Pirolisis	573-873	0.1–0.5	Minyak, Bahan bakar transportasi
Gasifikasi	773–1573	>0.1	Gas sintesis
Pembakaran	973–1673	>0.1	Panas, Listrik

Teknologi gasifikasi merupakan suatu bentuk peningkatan pendayagunaan energi yang terkandung di dalam bahan biomassa melalui suatu konversi dari bahan padat menjadi gas dengan menggunakan proses degradasi termal material-material organik pada temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna. Proses ini berlangsung di dalam suatu alat yang disebut *gasifier*. Ke dalam alat ini dimasukkan bahan bakar biomassa untuk dibakar di dalam reaktor (ruang bakar) secara tidak sempurna. Dengan kata lain, proses gasifikasi merupakan proses pembakaran parsial bahan baku padat, melibatkan reaksi antara oksigen dengan bahan bakar padat.

Berbagai konfigurasi reaktor gasifikasi telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Reaktor *downdraft*, *fluidized bed*, dan *entrained flow* adalah beberapa tipe yang umum digunakan. Studi oleh Sapariya *et al.* (2021), menyoroti bahwa pemilihan tipe reaktor dan kondisi operasional seperti suhu, rasio media gasifikasi, dan ukuran partikel biomassa sangat mempengaruhi komposisi *syngas* dan efisiensi proses. Penggunaan reaktor *fluidized bed*, misalnya, memungkinkan pencampuran yang lebih baik antara biomassa dan media gasifikasi, sehingga meningkatkan konversi biomassa menjadi *syngas*.

2.5. Gasifier

Gasifier adalah reaktor termokimia yang mengubah bahan bakar padat, seperti biomassa, menjadi gas sintesis (*syngas*) melalui proses gasifikasi. Proses ini melibatkan reaksi pada suhu tinggi dengan suplai oksigen terbatas, menghasilkan gas yang terdiri dari karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan nitrogen (N₂). Gasifikasi memungkinkan pemanfaatan limbah biomassa menjadi sumber energi yang bersih dan efisien (Basu, 2010). Komponen gas sintetis ini merupakan hal yang penting dalam mesin pembakaran internal, boiler, sel bahan bakar, dan bahan bakar sintetis. Efisiensi gasifikasi yang lebih tinggi, lebih sedikit debu, dan lebih sedikit diproduksi merupakan pertimbangan penting dalam gasifikasi (Hoque *et al.*, 2021).

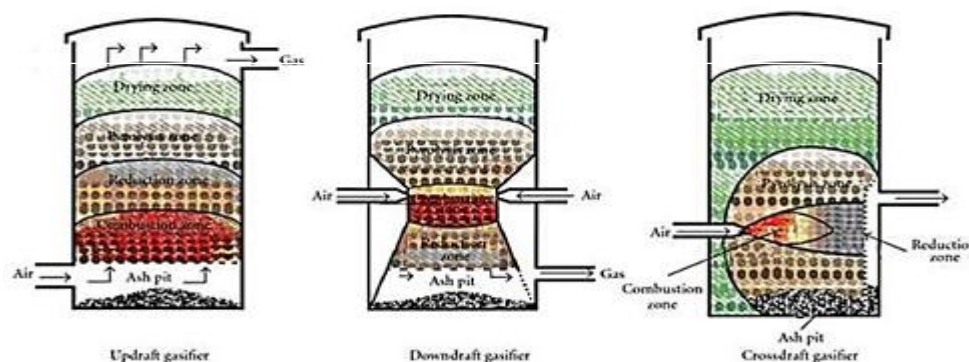
Menurut Sharma (2005), proses pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi adalah empat langkah utama dalam proses gasifikasi. Dalam setiap proses terdapat respon yang berbeda dari produksi kimia dan pelepasan senyawa.

- a. Proses Pengeringan. Proses ini merupakan proses paling awal dimana *feedstock* mengalami pengurangan kadar air tanpa mengalami penguraian unsur-unsur kimianya (dekomposisi kimia). Proses ini bergantung pada suhu yang digunakan. Semakin tinggi suhu yang diberikan, semakin cepat pula kadar air akan berkurang (Wirandika, 2016).
- b. Proses Pirolisis. Proses lanjutan setelah pengeringan dimana terjadi dekomposisi termal kandungan senyawa gas dan menyisakan arang atau

karbon. Bahan kering kemudian dibakar dalam ruang bebas oksigen. Dalam proses ini gas ringan seperti H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , dan C_xH_y , karbon atau arang, dan tar biasanya diproduksi. Proses pirolisis terjadi pada suhu dari $150^\circ C$ hingga $800^\circ C$ (Surjosatyo, 2014).

- c. Proses Oksidasi. Proses oksidasi terjadi pada suhu $600^\circ C$ – $1.400^\circ C$. Oksidasi merupakan proses terpenting karena menyediakan semua energi panas yang dibutuhkan untuk reaksi endotermik. Oksigen yang dimasukkan ke reaktor bereaksi dengan bahan yang mudah terbakar. Reaksi ini menghasilkan H_2O dan CO_2 , yang keduanya akan direduksi secara berurutan (Rismawan, 2013).
- d. Proses Reduksi. Proses reduksi terdiri dari serangkaian reaksi endotermik yang dipertahankan oleh panas yang dihasilkan oleh pembakaran. Proses ini terjadi pada suhu dari $600^\circ C$ hingga $900^\circ C$ dan menghasilkan gas yang mudah terbakar seperti H_2 , CO , dan CH_4 (Siagian, 2016).

Terdapat 3 tipe gasifikasi berdasarkan arah aliran udara (Gambar 4), tipe pertama yaitu tipe *updraft*, dimana sumber panas ditempatkan di bagian bawah bahan bakar dan aliran udara bergerak ke atas. Tipe *downdraft*, dimana sumber panas ditempatkan di bagian bawah bahan bakar, dan aliran udara pergi ke zona gasifikasi pada bagian bawah. Terakhir merupakan tipe *inverted downdraft*, dimana zona pembakaran berada di atas reaktor dan bahan bakar berada pada bagian bawah reaktor (NETL, 2022).



Gambar 4. Berbagai tipe *gasifier* (Sumber: <http://gekgasifier.com/gasification-basics/gasifier-types/>)

2.6. Gasifier Tipe Downdraft

Gasifier tipe *downdraft* adalah salah satu jenis reaktor gasifikasi yang umum digunakan untuk mengubah biomassa menjadi gas sintesis (*syngas*) melalui proses termokimia (Budiarto dkk., 2021). Sistem gasifikasi *downdraft* memiliki sistem yang hampir sama dengan sistem gasifikasi *updraft* yaitu dengan memanfaatkan sistem oksidasi tertutup untuk memperoleh temperatur tinggi. Bahan bakar dalam reaktor gasifikasi *downdraft* dimasukkan dari atas reaktor dan udara dari *blower* dihembuskan dari samping menuju ke zona oksidasi sedangkan *syngas* hasil pembakaran keluar melalui *burner* yang terletak di bawah ruangan bahan bakar sehingga saat awal gas akan mengalir ke atas dan saat volume gas makin meningkat maka *syngas* mencari jalan keluar melalui daerah dengan tekanan yang lebih rendah (Lihantoro, 2022).

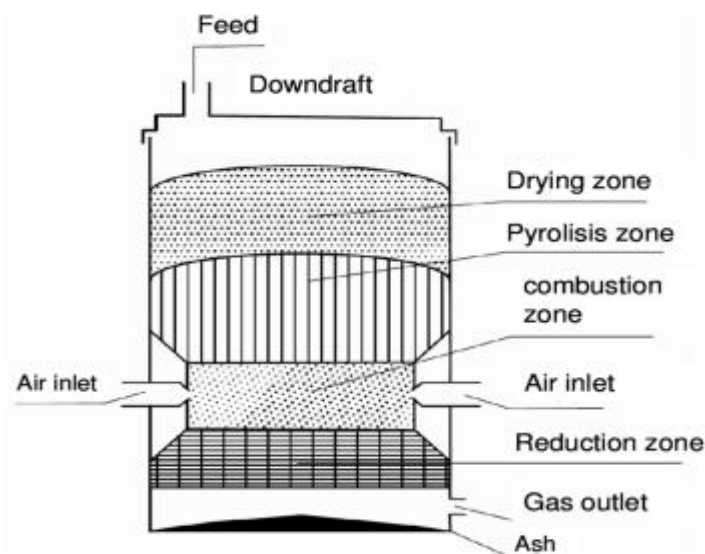
Setiap alat gasifikasi memiliki karakteristik tersendiri yang membedakan suatu sistem gasifikasi dengan sistem gasifikasi yang lain. Hasil reaksi dan *syngas* yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing alat gasifikasi tersebut (Akhtar *et al.*, 2021). Menurut Syarif (2020), banyaknya komposisi yang dapat terbakar juga memengaruhi kandungan energi yang dihasilkan sehingga akan terjadi peningkatan nilai panas atau LHV (*Low Heating Value*). Berikut contoh (Tabel 3) yang memperlihatkan sistem operasi dari alat gasifikasi tersebut:

Tabel 3. Produksi kandungan tar pada alat gasifikasi

Jenis Gasifikasi	Rata-rata Konsentrasi Tar dalam Produk (g/Nm ³)	Persentase tar pada bahan bakar biomassa
<i>Downdraft</i>	<1	<2
<i>Fluized bed</i>	10	1-5
<i>Updraft</i>	50	10-20
<i>Entrained flow</i>	<i>Negligible</i>	-

Reaktor gasifikasi terdiri dari berbagai jenis dan tipe. Perbedaan yang ada didasarkan pada interaksi yang terbentuk antara bahan baku dengan udara. Jenis reaktor yang paling umum digunakan adalah tipe *fixed-bed downdraft* (Gambar

5). Hal ini dikarenakan reaktor tipe ini menghasilkan kandungan tar yang lebih sedikit daripada jenis gasifier lainnya (Widodo dan Arifin, 2023). Kandungan tar yang dihasilkan *downdraft gasifier* pada proses pirolisis terbawa masuk ke dalam proses oksidasi yang kemudian terurai menjadi senyawa yang lebih ringan (Amrullah dan Evila, 2019). Keuntungan lain dari *gasifier downdraft* adalah reaktor ini bisa dipakai untuk proses gasifikasi yang berkelanjutan dapat digunakan untuk operasi gasifikasi yang berkelanjutan.



Gambar 5. Alur gasifikasi pada *downdraft gasifier* (Sumber: Marcic et al., 2016)

2.7. Syngas

Syngas atau gas sintesis, adalah campuran gas yang terdiri terutama dari hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO), dengan kandungan tambahan seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan nitrogen (N_2). Gas ini dihasilkan melalui proses gasifikasi, yaitu konversi termokimia dari bahan organik seperti biomassa atau batubara dalam kondisi terbatas oksigen (Manatura, 2023). Menurut *National Energy Technology Laboratory* (NETL), *syngas* dapat digunakan sebagai bahan bakar atau sebagai bahan baku dalam produksi bahan kimia seperti metanol dan amonia. Untuk gasifikasi tipe *downdraft*, *syngas* yang dihasilkan biasanya memiliki kualitas yang cukup baik karena jalur aliran gas melewati zona pembakaran dan reduksi, yang membantu menurunkan kandungan tar (Firmansyah dan Herlamba, 2021). Komposisi *syngas* yang tergolong dalam

kategori baik yaitu yang memiliki rasio energi tinggi dan minim pengotor. Berikut adalah kisaran komposisi ideal syngas dari *downdraft gasifier* (Tabel 4).

Tabel 4. Komposisi *syngas* ideal dari *downdraft gasifier*

Komponen Gas	Kisaran Kandungan (% volume)
Karbon monoksida (CO)	18 – 22%
Hidrogen (H ₂)	15 – 20%
Metana (CH ₄)	1 – 5%
Karbondioksida (CO ₂)	9 – 12%
Nitrogen (N ₂)	40 – 55%
Oksigen (O ₂)	0.5 – 2%
Uap air (H ₂ O)	0 – 5%
Tar	<100 mg/Nm ³

Komposisi *syngas* sangat dipengaruhi oleh faktor seperti suhu reaktor, rasio agen gasifikasi (udara atau uap), dan jenis bahan baku. Penelitian oleh Chojnacki *et al.* (2020), menunjukkan bahwa peningkatan suhu reaktor dan laju aliran uap dapat meningkatkan kandungan H₂ dalam *syngas*, sementara kandungan CO dapat menurun. *Syngas* dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin untuk pembakaran internal. Volatil dan tar akan dilepaskan di bawah suhu tinggi di zona pirolisis dan kemudian hancur serta teroksidasi di bawah suhu tinggi pada zona oksidasi (Valderrama *et al.*, 2018).

2.8. Biochar

Biochar merupakan material padat yang kaya karbon, dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa seperti kayu, limbah ternak, seresah, dan daun dalam kondisi suhu tinggi dan kadar oksigen yang sangat rendah (Gambar 7). Dalam proses gasifikasi, *biochar* merupakan salah satu hasil samping (*by-product*) yang dihasilkan. Produk ini umum dimanfaatkan dalam sektor pertanian sebagai pembenah tanah (*soil amendment*) yang berfungsi meningkatkan kualitas tanah (Oni *et al.*, 2019). Meskipun proses produksinya serupa dengan pembuatan arang

yang dikenal sebagai salah satu teknologi energi tertua dalam sejarah industri, *biochar* secara khusus ditujukan untuk aplikasi agronomis.



Gambar 6. *Bio-charcoal* atau arang hasil pirolisis

Biochar umumnya diperoleh melalui proses pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) yang dikenal sebagai karbonisasi konvensional. Metode ini melibatkan pemanasan biomassa secara bertahap pada suhu yang relatif rendah dalam kondisi terbatas oksigen (Evizal dan Prasmatiwi, 2023). Karena laju pemanasannya yang rendah dan oksidasi yang minimal, proses ini memerlukan durasi yang cukup panjang, bahkan dapat berlangsung hingga satu hari penuh. Teknik ini memungkinkan pembentukan *biochar* dengan rendemen yang tinggi dan struktur karbon yang stabil. Perbedaan suhu akan menghasilkan karakteristik *biochar* yang berbeda (Hidayat dkk., 2017). Hal ini mempengaruhi efektivitas *biochar* ketika diaplikasikan sebagai pembenah dan remediasi tanah (Hidayat *et al.*, 2021; Wijaya *et al.*, 2022).

Pembuatan *biochar* dengan proses pirolisis membutuhkan energi yang cukup tinggi karena kondisi operasi suhu tinggi ($> 400^{\circ}\text{C}$). Proses ini hampir sama dengan produksi arang. *Biochar* dapat dibedakan dari arang, digunakan terutama sebagai bahan bakar karena aplikasi utama digunakan sebagai perbaikan tanah dan meningkatkan fungsi tanah dan untuk mengurangi emisi dari biomassa yang sebaliknya secara alami akan terdegradasi menjadi gas rumah kaca (Rombel *et al.*, 2022). *Biochar* sering dipersepsikan sama dengan arang maupun karbon aktif, Tabel 5 memperlihatkan perbedaan mendasar antara arang, *biochar*, dan

karbon aktif dari sisi bahan baku, kegunaan, ukuran kualitas, produksi dan biaya produksi serta jejak karbon yang diakibatkan.

Tabel 5. Perbedaan antara arang, *biochar*, dan karbon aktif

	Arang	<i>Biochar</i>	Karbon Aktif
Bahan baku	Kayu, serbuk kayu ditambah agen perekat	Limbah pertanian dan bahan organik lainnya	Tempurung kelapa, gambut, batubara, petroleum pitch
Kegunaan	Bahan bakar	Remidiasi dan peningkatan kualitas tanah, filtrasi, agen perekat	Filtrasi, pereduksi bau, remediasi, agen perekat
Ukuran kualitas	Rendahnya asap yang dihasilkan	Kapasitas adsorpsi, porositas	Adsorpsi
Produksi	Pirolisis atau kilns temperature rendah (350°C)	Pirolisis tanpa oksigen, gasifikasi, temperature 450-800°C	Pirolisis temperature 600-900°C dilanjutkan dengan aktivasi pada temperature 250°C atau impragnasi kimia 450-900°C
Biaya produksi	Rendah-sedang	Sedang	Tinggi
Jejak karbon	Karbon netral dapat menyebabkan deforestasi	Emisi negatif	Emisi tinggi

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada April 2025 – Oktober 2025. Persiapan alat dan bahan, pengambilan sampel serta analisis komposisi *syngas* dilakukan di *Workshop*, Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Laboratorium Terpadu Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang akan digunakan pada penelitian yaitu 20 kg pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) yang diperoleh secara komersil dari PT. IGJ Wood Pellet, Natar, Lampung Selatan, Lampung. Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain reaktor *downdraft gasifier* 15 kwh, *Portable Gas Pre-Treatment Device*, *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P*, *generator*, *flame gun*, dan laptop.

3.3. Metode Pengambilan Data

3.3.1. Persiapan Sampel

Bahan utama yang menjadi sampel penelitian ini adalah kayu karet di mana kayu karet tersebut diolah menjadi pelet dengan kadar air di bawah 15%. Pelet tersebut diayak untuk mendapatkan ukuran yang seragam guna mendukung proses gasifikasi yang efisien seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pelet kayu karet

3.3.2. Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi dilakukan dengan langkah – langkah berikut ini:

1. Aktifkan *generator* untuk menggerakkan *reaktor gasifier*:



Gambar 8. Generator

2. Masukkan 20 kg pelet kayu karet yang telah disiapkan ke dalam *feedstock* dan tutup rapat penutupnya untuk memastikan tidak ada kebocoran gas.



Gambar 9. Pelet kayu karet di dalam *feedstock gasifier*

3. Nyalakan reaktor secara manual melalui lubang penyalan menggunakan *flame gun* atau alat pemantik.



Gambar 10. Corong untuk menyalakan api pada reaktor

4. Tombol *blower* dinyalakan untuk menciptakan aliran sehingga membantu menarik nyala api ke dalam reaktor dan memulai proses gasifikasi dengan mempercepat pembakaran awal.



Gambar 11. Tampilan layar reaktor

5. Setelah temperature mencapai $+200^{\circ}\text{C}$, *syngas* siap untuk dianalisis.

3.4. Analisis Parameter

3.4.1. Analisis *Syngas*

Analisis *syngas* dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan metana (CH_4) dalam bahan baku. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Portable Infra-red Syngas Analyzer Gasboard 3100P* (Wuhan Cubic Optoelectronics Co, Ltd) yang digunakan untuk pengukuran simultan konsentrasi CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , dan O_2 dalam *syngas* (gas sintesis).

Gas yang telah mencapai temperatur $+200^{\circ}\text{C}$ dapat dianalisis setelah melewati proses pendinginan. Adapun langkah - langkah dalam proses analisis *syngas* adalah sebagai berikut:

1. Katup penghubung *downdraft gasifier* dengan *syngas analyzer* dibuka agar gas dapat terhubung ke *Portable Gas Analyzer*.



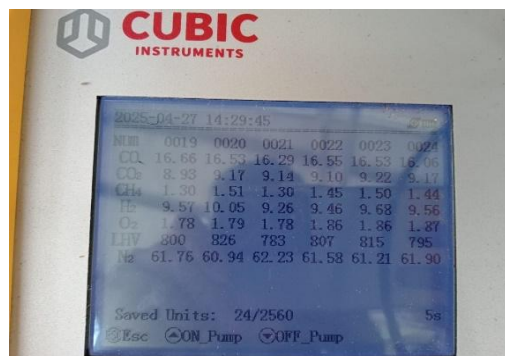
Gambar 12. Katup penghubung

2. Gas dikonversi menggunakan *Conditioning and Filter Syngas Analyzer*.



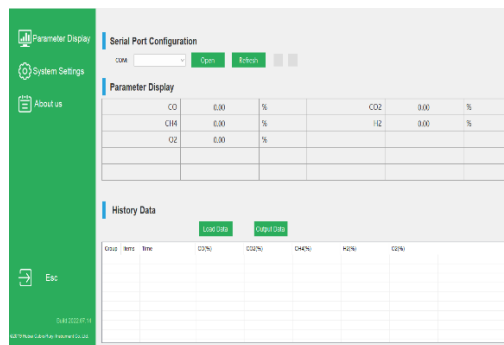
Gambar 13. *Conditioning and Filter Syngas Analyzer*

3. Tampilan layar pada *Portable Syngas Analyzer* setelah gas dikonversi dan *syngas* siap untuk dianalisis.



Gambar 14. *Portable Syngas Analyzer*

4. Syngas yang telah dikonversi kemudian dianalisis menggunakan *software Gas Analyzer V2.0.12*.



Gambar 15. *Software Gas Analyzer V2.0.12*.

3.4.2. Analisis *Lower Heating Value (LHV) Syngas*

Nilai kalor (*Heating Value*) diperoleh dengan menggunakan *portable gas analyzer*. Nilai kalor yang diperoleh melalui *portable gas analyzer* adalah nilai kalor bawah atau *Lowest Heating Value (LHV)*. Nilai kalor pembakaran atau LHV adalah nilai pembakaran dimana panas pengembunan uap air dari hasil pembakaran tidak ikut dihitung sebagai panas dari proses pembakaran (Nopita *et al.*, 2024). Nilai LHV syngas dihitung menggunakan Persamaan (1), dengan perhitungan yang dilakukan melalui *software gas analyzer V2.0.12*.

$$LHV \text{ Syngas } (Kcal/m^3) = (X_i CO \times LHV CO) + (X_i H_2 \times LHV H_2) + (X_i CH_4 \times LHV CH_4) \quad (1)$$

di mana X_i adalah fraksi volume gas i (% volume), dan LHV_i adalah nilai kalor yang diukur untuk 1 Nm³ gas murni. Beberapa studi telah dilakukan menggunakan metode ini dan memberikan gambaran yang lebih akurat tentang nilai kalor gas sintesis yang dihasilkan selama gasifikasi pelet kayu karet (Salem *et al.*, 2022; Rey *et al.*, 2025).

3.4.3. Analisis Proksimat

Ash merupakan salah satu dari produk samping (*by-product*) gasifikasi. Pengambilan sampel *ash* dilakukan 24 jam pasca pengoperasian *gasifier* untuk memastikan kondisi telah cukup dingin karena *ash* yang baru dihasilkan masih bersuhu tinggi dan mengandung nyala api. *Ash* yang telah dikumpulkan dianalisis menggunakan analisis proksimat.

Analisis proksimat merupakan pengujian yang meliputi uji kadar air, kadar zat menguap, kadar abu, dan karbon terikat. Analisis ini dilakukan pada pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan *ash* sebagai *by-product* gasifikasi.

a) Kadar Air (*Moisture Content*)

Kadar air adalah persentase massa air yang terkandung dalam suatu bahan dibandingkan dengan massa total bahan tersebut. Dalam metode ini sampel yang telah diketahui beratnya (1 gram) pada *crucible* dengan tutup dan kemudian dikeringkan pada temperatur 105°C selama 60 menit (SNI 8675-2018).

Selanjutnya kadar air (*moisture content*) diperoleh dari persamaan 2 berikut ini:

$$MC = \frac{W-B}{W} \times 100 \quad (2)$$

Keterangan:

Mc : kadar *moisture content* yang dianalisis (%)

W : massa spesimen yang dianalisis (g)

B : massa spesimen setelah dikeringkan pada pengujian *moisture* (g)

b) Kadar Zat Menguap (*Volatile Matter*)

Zat terbang (*Volatile Matter*) adalah bagian dari biomassa (seperti pelet kayu) yang menguap atau terurai menjadi gas saat dipanaskan dalam kondisi bebas oksigen pada suhu tinggi. Kadar *volatile matter* dilakukan setelah melakukan analisis kadar air. *Crucible* sampel pada *carousel* TGA ditutup dan dilakukan penimbangan ulang pada sampel yaitu 1 gram. Sampel dianalisis dengan dibakar dalam *furnace* TGA pada 950°C selama 7 menit (SNI 8675-2018). Persentase *volatile matter* pada sampel yang dianalisis diperoleh dari persamaan 3 berikut:

$$VM = \frac{B-C}{W} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

VM : kadar *volatile matter* yang dianalisis (%)

C : massa dari spesimen setelah pemanasan pada pengujian *volatile matter* (g)

W : massa spesimen yang dianalisis (g)

B : massa spesimen setelah dikeringkan pada pengujian *moisture* (g)

c) Kadar Abu (*Ash Content*)

Kadar abu adalah persentase sisa padatan anorganik (mineral) yang tidak terbakar setelah bahan organik dalam sampel dipanaskan secara sempurna pada suhu tinggi. Uji kadar abu dilakukan setelah melakukan analisis kadar *volatile matter*. Tutup *crucible* ditutup dan sampel 1 gram dibakar dalam *furnace* TGA pada 750°C selama 1 jam (SNI 8675-2018). Persentase *ash* pada sampel yang dianalisis diperoleh dari persamaan 4 berikut ini:

$$Ash = \frac{F-G}{W} \times 100 \quad (4)$$

Keterangan:

Ash : kadar *ash* yang dianalisis (%)

F : massa dari *crucible* dan residu abu(g)

G : massa dari *crucible* kosong (g)

W : massa spesimen yang dianalisis (g)

d) Karbon Terikat (*Fixed Carbon*)

Karbon terikat adalah sisa karbon padat dalam bahan bakar setelah kadar air, zat menguap (*volatile matter*), dan abu dihilangkan. Karbon terikat adalah bagian dari bahan bakar yang membara perlahan dan merupakan sumber utama panas dalam proses pembakaran atau gasifikasi.

$$FC = 100 - (Mc + Ash + VM) \quad (5)$$

Keterangan:

Mc : kadar air (%)

Ash : kadar abu (%)

VM : zat terbang (%)

3.5. Analisis Data

Data yang diperoleh berupa nilai rata-rata (*mean*), nilai minimum, dan nilai maksimum serta standar deviasi sebagai bahan analisis data. Data yang telah diperoleh kemudian dianalisis menggunakan analisis statistik, deskriptif, dan

komparatif. Analisis deskriptif digunakan untuk mendefinisikan karakteristik dan sifat kimia dari objek penelitian yaitu *syngas* dan *ash (by-product)* gasifikasi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses gasifikasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) menghasilkan gas sintesis dengan komponen utama karbon monoksida (CO) 17–20%, hidrogen (H₂) 10–12%, karbon dioksida (CO₂) 8–10%, metana (CH₄) 1–2%, dan oksigen (O₂) <1%. Komposisi ini menunjukkan bahwa reaksi reduksi karbon berlangsung efektif selama fase stabil gasifikasi.
2. Peningkatan temperatur reaktor dari 200°C hingga 600°C berpengaruh terhadap peningkatan nilai kalor (LHV) syngas dari 734,81 Kcal/m³ menjadi 780,85 Kcal/m³. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu operasi, semakin optimal pembentukan gas CO dan H₂ sebagai komponen yang memiliki energi yang tinggi.
3. Proses gasifikasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) menurunkan kadar air dan zat terbang secara signifikan, disertai peningkatan kadar abu hingga lebih dari 70%. Nilai karbon terikat yang rendah (4–6%) menunjukkan bahwa sebagian besar energi biomassa telah terkonversi menjadi gas sintetis, sehingga pelet kayu karet tergolong bahan bakar biomassa yang efisien dengan residu abu yang masih bernilai guna.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah didapatkan, perlu adanya penelitian lanjutan tentang perbandingan karakteristik hasil gasifikasi menggunakan berbagai bahan baku berbeda yang dapat diambil dari limbah hasil penebangan hutan rakyat seperti sengon, jabon, dan mahoni. Selain itu, diperlukan juga penelitian untuk memvariasikan rasio udara dan bahan bakar (*equivalence ratio*) guna menentukan kondisi operasi paling efisien terhadap komposisi dan nilai kalor gas sintesis. Penggunaan sistem pembersihan gas (*gas cleaning system*) perlu diterapkan agar

syngas yang dihasilkan dapat digunakan langsung untuk aplikasi energi seperti pembangkit listrik atau pengering biomassa dalam skala rumah tangga maupun industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Afin, A. P., Kiono, B. F. T. 2021. Potensi energi batubara serta pemanfaatan dan teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050 : Gasifikasi Batubara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 2(2): 144-122.
- Agustina, N., Syamsiro, M., Suwardin, S. 2021. Produksi asap cair dari kayu karet dengan berbagai waktu pirolisis. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*. 14(2): 123–130.
- Akhtar, A., Saidina Amin, N. A., Bakar, M. H. A. 2021. A review on the process of biomass gasification and production of hydrogen via reforming of volatile by-products. *Cleaner Energy Systems*.1: 100036.
- Akowuah, J. O., Kemausuor, F., dan Mitchual, S. J. 2012. Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 3, 1-6.
- Alamsyah, R., Siregar, N.C., dan Hasanah, F. 2017. Torrefaction study for energy upgrading on Indonesian biomass as low emission solid fuel. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 65(1), 012051.
- Aprilia, R., Siregar, I. H. 2023. Pengaruh laju aliran udara terhadap kualitas nyala api dan efisiensi kompor gasifikasi biomassa tipe *updraft* dengan bahan bakar tempurung kelapa. *Jurnal Teknik Mesin*. 11(2): 39-46.
- Arrofi, A. I., Febryano, I. G., Prasetya, H., Hidayat, W. 2025. Thermal Degradation-Induced Hydrophobicity and Improved Moisture Resistance of Pyrolyzed Betung Bamboo and Rubberwood Pellets. *Forest and Nature*. 1(3): 143–151.
- Badan Pusat Statistik. 2023. *Statistik Karet Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik, Jakarta. Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. 2018. *SNI 8675-2018: Pelet biomassa untuk energi*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta. Indonesia.
- Bahri, S., Nurchayati, A., Mulyanto. 2018. Pengaruh variasi laju aliran udara dengan penambahan uap air pada gasifikasi tipe up draft berbahan kotoran

kuda terhadap persentase kadar gas H_2 , CH_4 , CO dan CO_2 . *Jurnal Dinamika Teknik Mesin*. 1(1): 1-6.

Basu, P. 2010. *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press.

Bazenet, R. A., Hidayat, W., Ridjayanti, S. M., Riniarti, M., Banuwa, I. S., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh kadar perkat terhadap karakteristik briket arang limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 10(3): 283-295.

Brayen, D. R., Winndiarti, R. Y. P., Erlinawati., Zikri, A. 2022. Pengaruh variable proses dan penambahan cangkang kelapa sawit terhadap karakteristik biopelet serbuk gergaji. *Jurnal Distilasi*. 7(1):41-51.

Budiarto, H., Umam, F., Irawan, I. 2021. *Gasifikasi Teori, Perancangan dan Penerapannya*. MNC Publishing. Malang.

Chojnacki, J., Najser, J., Rokosz, K., Peer, V., Kielar, J., Berner, B. 2020. Syngas composition: Gasification of wood pellet with water steam through a reactor with continuous biomass feed system. *Energies*. 13(17): 4376.

Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., Bouziane, K. 2013. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*. 36: 596–606.

Direktorat Jenderal Perkebunan. 2025. *Statistik perkebunan 2023-2025*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian.

Elfiano, E., Suropto, H., Hastuti, K., Arizona, R., Lihantoro, B. 2025. Karakteristik sistem gasifikasi tipe downdraft gasifier berbahan bakar biomassa berdasarkan variasi volume ruang bakar. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 16(1): 441-454.

El-Sayed, S. A., Mostafa, M. E., Khass, T. M., Noseir, E. H., Ismail, M. A. 2024. Combustion and Mass Loss Behavior and Characteristics of a Single Biomass Pellet Positioning at Different Orientations in A Fixed Bed Reactor. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(14), 15373–15393.

Evizal, R., Prasmatiwi, F. E. 2022. Gejala produktivitas rendah dan pertanian degeneratif. *Jurnal Agrotropika*. 21(2): 75–85.

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

Gao, Y., Wang, M., Raheem, A., Wang, F., Wei, J., Xu, D., Song, X., Bao, W., Huang, A., Zhang, S., Zhang, H. 2023. Syngas production from biomass

gasification: Influences of feedstock properties, reactor type, and reaction parameters. *ACS Omega*. 8(35):31620-31631.

Global Bioenergy Statistics. 2020. World Bioenergy Association.

Hariyanto, M. D. 2022. Pengaruh kadar air sekam padi terhadap efisiensi pembakaran kompor gasifikasi. *Journal of Energy, Materials, & Manufacturing Technology*. 1(1): 7-11.

Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., dan Lee, S. 2021. Characteristics of biochar produced from the harvesting wastes of meranti (*Shorea sp.*) and oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 749.

Hidayat, W., Wijaya, B. A., Saputra, B., Rani, I. T., Kim, S., Lee, S., Lubis, M. A. R. 2024. Torrefaction of bamboo pellets using a fixed counterflow multibaffle reactor for renewable energy applications. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 10(1): 169–188.

Hidayati, S., Suroso, E., Setiawan, T., Septiyan, J. 2020. Analisis nilai tambah agroindustry barang jadi karet di Provinsi Lampung. *Jurnal TEKNOTAN*. 14(1): 1-5.

Hoque, M.E., Rashid, F., Aziz, M., 2021. Gasification and power generation characteristics of rice husk, sawdust, and coconut shell using a fixed-bed downdraft gasifier. *Sustainability*. 13(4): 20-27.

Hutasoit, W. P. A., Park, B., Dewi, B. S., Hidayat, W. 2025. Thermochemical Conversion of Rubber Wood Pellets via Downdraft Gasification: Syngas Composition, Heating Value Trends, and By-Product Characterization. *Forest and Nature*. 1(4): 214–227.

Ibrahim, A., Veremieiev, P. H., Gaaskell. 2022. An advanced, comprehensive thermochemical equilibrium model of adowndraft biomass gasifer. *Renewable Energy*. 194: 912-925.

Ibrahim, M, D., Abdalla, Y. A., Gan, S., Thangalazhy, S. G. 2022. Intermediate Pyrolysis of Bambara Groundnut Shell (BGS) in Various Inert Gases (N₂, CO₂, and N₂/CO₂). *Energies*. 15(22): 8421.

Iryani, D. A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanudin, U., Lee, S. 2019. Torrefaction upgrading of palm oil empty fruit bunches biomass pellets for gasification feedstock by using comb (counter flow multi-baffle) reactor. In *TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019*. 212–217.

Isgiyarta, J., Sudarmanta, B., Prakoso, J. A., Jannah, E. N., Saleh, A. R. (2022). *Micro-Grid Oil Palm Plantation Waste Gasification Power Plant in*

- Indonesia: Techno-Economic and Socio-Environmental Analysis*. *Energies*, 15(5), 1782.
- Ismanto, A., Saputro, Y. D. 2020. Analisis kimia kayu karet (*Hevea brasiliensis*) diawetkan secara tradisional. *Jurnal Sains Natural*. 4(2): 180.
- Kasawapat, J., Khamwichit, A., Dechapanya, W. (2024). *Waste-to-Energy Conversion of Rubberwood Residues for Enhanced Biomass Fuels: Process Optimization and Eco-Efficiency Evaluation*. *Energies*, 17(21), 5444.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2023. *Potensi Biomassa Indonesia Tahun 2023*. Kementerian ESDM, Jakarta. Indonesia.
- Kongprasert, N., Wangphanich, P., dan Jutilarptavorn, A. 2019. Charcoal briquettes from Madan wood waste as an alternative energy in Thailand. *Procedia Manufacturing*. 30, 128-135.
- Koryati, T., Tistama, R. 2020. Peran paklobutrazol terhadap pertumbuhan tanaman dan fisiologi lateks beberapa klon karet. *Jurnal Penelitian Karet*. 38(1): 49–64.
- Lamart, N. S., Vichanpol, B., Natakaranakul, J., Wattanavichien, K. 2020. Syngas production for Fischer-Tropsch synthesis from rubber wood pellets and eucalyptus wood chips in a pilot horizontal gasifier with CaO as a tar removal catalyst. *ACS Omega*. 7(49): 44951-44961.
- Laosena R, Palamanit A, Luengchavanon M, Kittijaruwattana J, Nakason C, Lee SH, Chotikhun A. 2022. Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel. *Materials (Basel)*. 15(9):3093.
- Lihantoro, D. 2022. *Analisa Proses Gasifikasi Sekam Padi dan Serbuk Gergaji dengan Gasifier Tipe Downdraft*. Universitas Islam Riau.
- Lukmanto, A., Banowati, G. 2024. Karakteristik biopelet dari limbah biomassa tanaman dengan perekat tepung. *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan dan Pendidikan Vokasi Pertanian*. 5(1): 713-727.
- Manatura, T. 2023. Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters. *ACS Omega*. 3(3): 3050–3060.
- Marcic, S., Marcic, M. 2017. *Electricity and heat production by biomass cogeneration. Conference: International Conference Of Numerical Analysis And Applied Mathematics (ICNAAM 2016)*. Rusia.

- Mishra, S., Upadhyay, R. K. 2021. Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. *Journal of Materials Science for Energy Technologies*. 4(2021): 329-340.
- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Lee, S., Yoo, J. 2023. Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 113193.
- National Energy Technology Laboratory (NETL). 2022. *Gasification Handbook: Technologies and Processes for Modular Gasification*. U.S. Department of Energy.
- Ningtyas, K. rimadhanti, Muslihudin, M., Sari, I. N. 2020. Sintesis nanoselulosa dari limbah hasil pertanian dengan menggunakan variasi konsentrasi asam. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*. 20(2): 142-147.
- Nopita, D., Nuramal, A., Supadi, N. I. 2024. Analisa nilai kalor bahan bakar boiler fiber dan cangkang. *Jurnal Rekayasa Mekanika*. 8(1): 15-21.
- Obernberger, I., Thek, G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*. 27(6): 653–669.
- Oni, B. A., Oziegbe, O., Olawole, O. O. 2019. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*. 64(2): 222–236.
- Pahnla, M., Koskela, A., Sulasalmi, P., Fabritius, T. 2023. A Review of Pyrolysis Technologies and the Effect of Process Parameters on Biocarbon Properties. *Energies*. 16(19), 6936.
- Parinduri, L., Taufik, P. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2): 88-92.
- Pemerintah Republik Indonesia. 2022. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik*.
- Pocha, C. K. R., Chia, W. Y., Silvanir, Kurniawan, T. A., Khoo, K. S., Chew, K. W. 2023. Thermochemical conversion of different biomass feedstocks into hydrogen for power plant electricity generation. *Fuel*. 340.
- Pratiwi, I. 2020. Rancang bangun alat gasifikasi biomassa (kayu karet) sistem *updraft single gas outlet*. *Jurnal Teknik Putra Akademika*. 11(1): 38 -49.
- Prayitno, J., Violet, V., Kurdiansyah, K. 2020. Karakteristik pellet dari kayu karet (*Hevea brasiliensis*) tidak produktif di Desa Danau Salak Kabupaten Banjar Kalimantan Selatan. *Jurnal Sylva Scianteae*. 3(6):1112-1122.

- Primadita, D. S., Kumara, I. N. S., Ariastina, W. G. 2020. A review on biomass for electricity generation in Indonesia. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*. 4(1): 1-9.
- Ramesh, A., Kumar, P. 2024. Kinetics of CO₂ Evolution in Biomass Gasification under Varied Operating Conditions. *Fuel*. 354 :129297.
- 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.
- Rey, J. R. C., Longo, A., Rijo, B., Mateos-Pedrero, C., Brito, P., Nobre, C. 2025. Modelling Syngas Combustion from Biomass Gasification and Engine Applications: A Comprehensive Review. *Energies*. 18(19), 5112.
- 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.
- Rismawan, R. 2013. *Peningkatan kadar karbon monoksida dalam gas mempan bakar hasil gasifikasi arang sekam padi*. Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
- Rombel, A., Krasucka, P., Oleszczuk, P. 2022. Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. *Science of the Total Environment*. 816: 1–17.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febriyano, 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.
- Safitri, A., Susi, E. 2023. Analisis komponen kimia dan dimensi serat kayu karet (*Hevea Brasiliensis* Mueu. Arg.) hasil klon.
- Salem, A. M., Dhami, H. S., Paul, M. C. 2022. Syngas Production and Combined Heat and Power from Scottish Agricultural Waste Gasification: A Computational Study. *Sustainability*. 14(7), 3745.
- Sanusi, A. Jasron, J., Tamonob, K. 2022. Analisis kandungan hasil proses gasifikasi sekam padi. *Jurnal Teknik Mesin Undana*. 9(2): 25-30.
- Sapariya, Y., Chandra, S., Das, A. K. 2021. Performance of biomass gasification systems: A comprehensive review. *International Journal of Green Energy*. 18(14): 1455–1472.
- Saputra, B., Tambunan, K.G.A., Suri, I.F., Febryano, I.G., Iswandaru, D., dan Hidayat, W. 2022. Effects of torrefaction temperature on the characteristics

- of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(2): 339–353.
- Saputro, D. D., Widayat, W. 2016. Karakterisasi limbah pengolahan kayu sengon sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Sainteknol*. 14(1): 25.
- Sharma, A. 2005. Design and CFD modeling of a biomass gasifier for syngas production. *Energies*.14(14): 4226.
- Siagian, K.J. 2016. *Eliminasi kandungan tar pada gasifikasi tandan kosong kelapa sawit*. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik - Universitas Andalas Padang.
- Siddique, I. J., & Salema, A. A. 2024. *Production of Syngas from Oil Palm Shell Biomass Using Microwave Gasification*. *Energy*, 306, 132468.
- Siswanto, J. E. 2020. Analisis limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler dengan menggunakan variasi campuran antara fiber dan cangkang buah sawit. *Journal of Electrical Power Control and Automation*. 3(1): 22-27.
- Stolarski, M. J., Stachowicz, P., Dudziec, P. 2022. Wood Pellet Quality Depending on Dendromass Species. *Renewable Energy*. 199, 498–508.
- Suhendi, E., Paradise, G.U., Priandana, I. 2017. Pengaruh laju alir udara dan waktu proses gasifikasi terhadap gas producer limbah tangkai daun tembakau menggunakan Gasifier Tipe Downdraft. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*. 5(2): 45–62.
- Sultan, S. H., Palamanit, A., Techato, K., Amin, M. 2021. Physiochemical characterization and potential of synthesis gas production from rubber wood biomass by using downdraft gasifier. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*. 40(1): 1-15.
- Sultan, S. H., Palamanit, A., Techato, K., Amin, M., Ahmed, K., Asadullah. 2020. Syngas production from rubberwood biomass in downdraft gasifier combined with Wet scrubbing: investigation of tar and solid residue. *Sains Malaysiana*. 49(7): 1729-1743.
- Surjosatyo, A. dan Vidian, F. 2014. Studi co-gasifikasi tandan kosong dan tempurung kelapa sawit menggunakan gasifier aliran kebawah. *In Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses*. Jakarta
- Suryanarayanan, T. S., Azevedo, J. L. 2023. From forest to plantation: a brief history of the rubber tree. *Indian Journal of History of Science*. 58: 74-78.
- Sutanto, R., Nurchayati., Pandiatmi, P., Mulyanto, A., Wirawan, M. 2015. *Pengaruh Laju Aliran Agent Gas Pada Proses Gasifikasi Kotoran Kuda Terhadap Karakteristik Syngas Yang Dihasilkan*. SNTTM XIV, Teknik Mesin, Fakultas Teknik. Universitas Mataram.

- Suwito, A., Afisna, L. P., Windiarto, A., Mahesha, D. A., Yudanta, F. R., Zarhimsyah, R. 2022. Analisis komposisi *biopellet* sebagai energi baru terbarukan dari limbah kayu karet. *Jurnal Teknik Mesin UNISKA*. 7(2): 84-89.
- Syamsudin, M., Mahdie, M. F., Sari, N. M. 2022. Pemanfaatan limbah serbuk kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan serbuk pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) sebagai bahan baku biopellet. *Jurnal Sylva Scientiae*. 5(1): 117-123.
- Syarif, A. 2020. Pengaruh variasi laju alir udara dan filter terhadap proses gasifikasi dengan sistem downdraft. *Kinetika*. 11(1): 36-44.
- 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. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 17(1): 11-20.
- Tiara T., Agustina T. E., M. Faizal. 2018. The Effect of air fuel ratio and temperature on syngas composition and calorific value produced from downdraft gasifier of rubber wood-coal mixture. *International Journal of Engineering*. 31(9).
- Trihusodo, P. 2022. *Indonesia Siap Jadi Pusat Energi Biomassa Dunia*. Portal Informasi Indonesia, Jakarta. Indonesia.
- Ukpanyang, D., Terrados, J. 2022. Decarbonizing Vehicle Transportation with Hydrogen from Biomass Gasification: An Assessment in the Nigerian Urban Environment. *Energies*. 15(9): 3200.
- Vachlepi, A. 2020. Prospek pemanfaatan kayu karet sebagai bahan baku pembuaatan pulp. *Jurnal Warta Perkaratan*. 38(1): 47-60.
- Valderrama, M.L., González, A.M., Lora, E.E.S., Almazán, O.A. 2018. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass and Bioenergy*. 108: 345-370.
- Waruwu, B. M. 2023. Krisis energi dan harga minyak stabilitas pasar dan dampak terhadap ekonomi dunia. *Circle Archive Ekonomi*. 1(2).
- Wang, B., Xu, J., Ding, W., Yang, W., Guo, X., Gao, S., Feng, X. 2025. AI-driven predictive modelling for syngas yield in hydrothermal biomass gasification. *Chemical Engineering Science*. 316: 0009-2509.
- Widodo, E., Arifin, Z. 2023. Gasifikasi biomassa dengan reaktor tipe downdraft: Kajian efisiensi dan performa. *Jurnal Rekayasa Energi dan Manufaktur*. 14(1): 45-52.

- Wijaya, B. A., Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetia, H., Niswati, A., Hasanudin, U., dan Yoo, J. 2022. Meranti (*Shorea sp.*) biochar application method on the growth of sengon (*Falcataria moluccana*) as a solution of phosphorus crisis. *Energies*. 15(6): 2110.
- Willich, C. (2024). Hydrogen as an Energy Carrier: An Overview over Technology, Status, and Challenges in Germany. *Multidiciplinary Scientific Journal*. (4), 546–570.
- Wirandika, W. 2016. *Karakterisasi proses gasifikasi campuran limbah kayu merawan dan tempurung kelapa dengan sistem downdraft kontinyu*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang.