

**KARAKTERISASI *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET BAMBU
BETUNG (*Dendrocalamus asper*) MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT*
*GASIFIER***

(Skripsi)

Oleh

**CHRISYAN FITO SIMAMORA
2214151111**



**JURUSAN KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

KARAKTERISASI *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*) MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER*

Oleh

CHRISYAN FITO SIMAMORA

Ketergantungan pada energi fosil mendorong eksplorasi sumber energi terbarukan, salah satunya melalui pemanfaatan biomassa bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai bahan baku gasifikasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi *syngas*, nilai *Lower Heating Value* (LHV), serta karakteristik proksimat pelet bambu betung dan produk samping (*ash*) hasil gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier*. Proses gasifikasi dilakukan selama 60 menit menggunakan 20 kg pelet bambu betung pada reaktor *downdraft gasifier* berkapasitas 15 kWh, dan analisis *syngas* dilakukan secara *real-time* menggunakan *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *syngas* yang dihasilkan mengandung rata-rata CO sebesar 13,62%, CO₂ 13,28%, CH₄ 2,55%, H₂ 8,65%, dan O₂ 1,64%, dengan nilai LHV rata-rata sebesar 887,57 kcal/m³. Analisis proksimat pelet bambu betung menunjukkan kadar air 7,10%, kadar abu 12,02%, kadar zat terbang 74,11%, dan karbon terikat 6,78%. Setelah gasifikasi, *ash* (*by-product*) memiliki kadar air 4,67%, kadar abu 73,09%, kadar zat terbang 17,61%, dan kadar karbon terikat 4,63%. Pelet bambu betung terbukti memenuhi syarat sebagai bahan baku *downdraft gasifier*, dengan kadar air di bawah 20% dan kadar zat terbang yang tinggi, sehingga berpotensi menjadi sumber energi terbarukan yang berkelanjutan.

Kata kunci: bambu betung, biomassa, *downdraft gasifier*, gasifikasi, *lower heating value*, pelet, *syngas*

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF SYNGAS PRODUCED VIA GASIFICATION OF BETUNG BAMBOO PELLETS (*Dendrocalamus asper*) USING A DOWNDRAFT GASIFIER

By

CHRISYAN FITO SIMAMORA

*The global reliance on fossil fuels has driven the exploration of renewable energy sources, including the use of betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) biomass as a feedstock for gasification. This study aims to analyze the syngas composition, lower heating value (LHV), and proximate characteristics of *D. asper* bamboo pellets, as well as the by-product (ash) resulting from their gasification in a downdraft gasifier. The gasification process was conducted for 60 minutes using 20 kg of *D. asper* bamboo pellets in a 15-kWh downdraft gasifier reactor, with real-time syngas analysis performed using a portable infrared syngas analyzer (Gasboard-3100P). The results demonstrated that the produced syngas contained average concentrations of 13.62% CO, 13.28% CO₂, 2.55% CH₄, 8.65% H₂, and 1.64% O₂, yielding an average LHV of 887.57 kcal/m³. Proximate analysis of the bamboo pellets revealed a moisture content of 7.10%, an ash content of 12.02%, a volatile matter content of 74.11%, and a fixed carbon content of 6.78%. Following gasification, the ash byproduct exhibited a moisture content of 4.67%, an ash content of 73.09%, a volatile matter content of 17.61%, and a fixed carbon content of 4.63%. These findings demonstrate that betung bamboo pellets meet the critical requirements for downdraft gasifier feedstock—specifically, a moisture content below 20% and high volatile matter—highlighting their potential as a sustainable, renewable energy source.*

Keywords: betung bamboo, biomass, downdraft gasifier, gasification, Lower Heating Value, pellets, syngas

**KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI PELET BAMBU
BETUNG (*Dendrocalamus asper*) MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT*
*GASIFIER***

Oleh

Chrisyan Fito Simamora

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : **KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI
PELET BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper*)
MENGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER***

Nama : **Chrisyan Fito Simamora**

NPM : **2214151111**

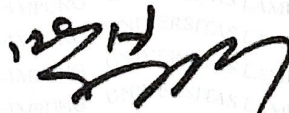
Jurusan : **Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**

Tanggal Pengajuan : **19 Juni 2026**

MENYETUJUI
1. Komisi Pembimbing


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


Bugae Park
R&D Director Sunbrand Industrial

2. Ketua Jurusan Kehutanan


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

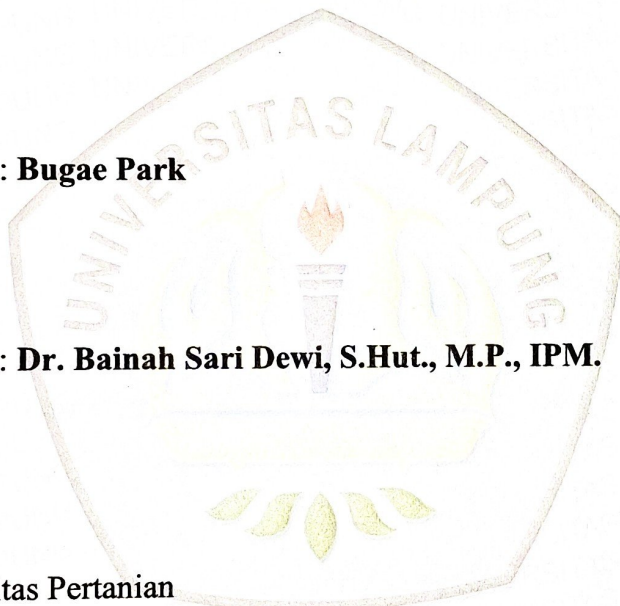
Ketua : **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.**



Sekretaris : **Bugae Park**



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



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

Tanggal lulus ujian skripsi: **18 Mei 2026**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Chrisyan Fito Simamora
NPM : 2214151111
Jurusan : Kehutanan
Alamat rumah : Desa Bah Sampuran, Kec. Jorlang Hataran, Kab.
Simalungun, Sumatera Utara

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

“Karakterisasi Syngas Hasil Gasifikasi Pelet Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) Menggunakan Downdraft Gasifier”

Adalah benar karya 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 bahwa pernyataan saya tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 19 Juni 2026
Yang membuat pernyataan



Chrisyan Fito Simamora
2214151111

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Chrisyan Fito Simamora yang akrab disapa Chrisyan, dilahirkan di Bah Sampuran, 05 Januari 2004. Penulis adalah anak tunggal yang merupakan anak dari pasangan Ayah Marganda David Simamora dan Ibu Bernika Wati Napitu. Penulis memulai pendidikan formal Sekolah Dasar di SDN 091488 Bah Sampuran tahun 2010-2016, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 3 Jorlang Hataran (2016-2019) dan Sekolah Menengah Atas (SMAN 1) Kecamatan Dolok Panribuan (2019-2022). Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi Himasyilva (Himpunan Mahasiswa Kehutanan Universitas Lampung) serta terlibat dalam kegiatan kepanitiaan. Penulis mengikuti organisasi internal di kampus, yaitu Himpunan Mahasiswa Kehutanan (Himasyilva) sebagai anggota Bidang 3 Penelitian dan Pengembangan organisasi selama satu periode (tahun 2025). Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan, yaitu sebagai ketua divisi hubungan masyarakat dalam kegiatan nasional Pelatihan Mahasiswa Kehutanan Indonesia (PMKI) yang diselenggarakan oleh Sylva Indonesia. Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti penulis yaitu melaksanakan magang selama 30 hari di Pusat Latihan Gajah (PLG), Taman Nasional Way Kambas (TNWK), Kabupaten Lampung Timur pada tahun 2024. Penulis juga telah melaksanakan KKN di Desa Karang Endah, Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2025. Pada tahun yang sama, pada bulan Juli-Agustus, penulis mengikuti kegiatan Praktik Umum (PU) selama 20 hari di Hutan Pendidikan Universitas

Gadjah Mada (UGM), yaitu KHDTK Getas, Kecamatan Kradenan, Blora, Jawa Tengah, dan KHDTK Wanagama, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Selama menempuh pendidikan, penulis berhasil meraih predikat unggul pada Surat Keterangan Pendamping Ijazah (SKPI) dengan total skor 500. Pencapaian ini merupakan akumulasi dari berbagai kegiatan kemahasiswaan dan program sertifikasi kompetensi yang telah diikuti oleh penulis, di antaranya PKKMB Universitas Lampung Tahun 2022, Susunan kepengurusan Himasyilva Tahun 2025, Panitia dalam suatu kegiatan kemahasiswaan yaitu Pelatihan mahasiswa kehutanan Tahun 2025, Panitia dalam suatu kegiatan kemahasiswaan HUT Himasyilva ke- 27 tahun 2024, mengikuti kegiatan atau forum ilmiah *Developing aquaculture comanagement systems, Land consolidation and land banking, Maintaining and restoring wetlands in agricultural settings, Management procedures for sustainable tuna fisheries – Introduction, Management procedures for sustainable tuna fisheries - Management strategy evaluation, Management procedures for sustainable tuna fisheries - Setting the vision, SDG Indicator 2.4.1 Proxy: Progress towards productive and sustainable agriculture, The Global Information System, The water-energy-foodecosystem nexus in agriculture, Trade and nutrition: Policy coherence for healthy diets, climate-smart forestry, SDG Indicators 2.5.1 and 2.5.2 - plant animal genetic resources, Biodiversity and agrifood systems – Introduction, Costing and monetizing benefits for nutrition, Global crop conservation strategies, How a national plant protection organization functions, Information gathering for forest management planning, Introduction to documenting plant genetic resources for food and agriculture, Introduction to forest management planning*, optimalisasi penguatan ketahanan pangan dan energi di kawasan hutan : mungkinkah?, urgensi rencana perubahan uu no.41 tahun1999, potensi agroforestri sebagai peluang ekspor untuk mewujudkan stabilitas perekonomian indonesia, Pelatihan Bahasa Inggris Ekstrakurikuler/Matrikulasi Bagi Mahasiswa Universitas Lampung Angkatan 2022, mengikuti kuliah tamu undangan dengan judul teknologi dan aplikasi perekat kayu ramah lingkungan, *navigating forest certification: lessons from the field as an FSC FM Auditor*, peran satwa liar sebagai pengendali ekosistem, peluang & tantangan pengelolaan hutan produksi menuju lestari ekonomi, sosial, dan ekologi.

Selain itu, sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan keilmuan, penulis telah mempublikasikan artikel ilmiah pada salah satu jurnal internasional (2026), yaitu *Journal Forest & Nature*, dengan judul “*Syngas Characteristics and Energy Performance of Betung Bamboo (Dendrocalamus asper) Pellets in a Downdraft Gasifier*” dengan penulis Chrisyan Fito Simamora, Bugae Park, Bainah Sari Dewi, dan Wahyu Hidayat.

*" Sungguh, Allah itu keselamatanku; aku percaya dengan tidak gementar,
sebab TUHAN ALLAH itu kekuatanku dan mazmurku, Ia telah menjadi
keselamatanku."*

(Yesaya 12:2)

SANWACANA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat penulisan skripsi berjudul “Karakterisasi *Syngas* Hasil Gasifikasi Pelet Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) Menggunakan *Downdraft Gasifier*” Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan pada Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, petunjuk, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati penulis mengucapkan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya 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.
4. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama, tas keikhlasannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, nasihat, serta motivasi yang sangat berharga selama 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. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku penguji pertama pada ujian skripsi. Terima kasih atas masukan, koreksi, dan saran-saran yang konstruktif demi penyempurnaan karya tulis ini.

7. Bapak Prof. Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si. selaku pembimbing akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan nasihat sejak awal perkuliahan hingga saat ini.
8. Segenap Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan wawasan kepada penulis selama masa perkuliahan. eluruh Staf Administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah banyak membantu kelancaran administrasi.
9. Penelitian ini didukung oleh fasilitas riset serta dukungan ilmiah dan teknis dari Karakterisasi Lanjut Lampung dan Karakterisasi Lanjut Cibinong – Laboratorium Bioproduk Terintegrasi di Badan Riset dan Inovasi Nasional.
10. Ayahanda tercinta, Marganda David Simamora. Terima kasih atas segala bentuk cinta, dukungan, ketulusan doa, nasihat, pengorbanan, dan perjuangan yang tak terhingga nilainya. Sosok Ayah adalah motivasi terbesar bagi penulis untuk terus bertahan dan menyelesaikan pendidikan ini.
11. Ibunda tersayang, Bernika Wati Napitu. Terima kasih atas kesabaran, didikan, doa yang tak pernah putus, serta curahan kasih sayang yang tulus. Ketegaran Ibu dalam menjalani hidup senantiasa menjadi teladan yang mendorong penulis untuk menjadi pribadi yang pantang menyerah dalam menghadapi segala rintangan hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan maksimal.
12. Rekan-rekan seperbimbingan yang telah berjuang bersama, bertukar pikiran, dan saling menguatkan selama proses penyusunan skripsi.
13. Teman-teman perantauan yang telah menjadi keluarga dan rumah kedua di tanah rantau. Terima kasih atas kekeluargaan, kebersamaan, semangat, dan dukungan yang luar biasa sehingga penulis tidak merasa sendirian selama menjalani perkuliahan jauh dari kampung halaman.
14. Teman-teman, sahabat, dan kerabat yang telah banyak memberikan semangat serta dukungan tanpa henti kepada penulis.
15. Keluarga besar Kehutanan angkatan 2022 (RERXTERION) dan keluarga besar Himasyilva Universitas Lampung yang telah kebersamai, memberikan pelajaran berharga, dan membantu penulis selama menjalani masa perkuliahan.
16. 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, 19 Mei 2026

Chrisyan Fito Simamora

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Kerangka Pemikiran	5
1.6. Hipotesis Penelitian.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Biomassa Sebagai Energi Terbarukan.....	7
2.2. Bambu Betung.....	8
2.3. Pelet Bambu	10
2.4. Gasifikasi.....	11
2.5. <i>Gasifier</i>	12
2.6. <i>Synthetic gas (Syngas)</i>	14
2.7. Hasil Samping Gasifikasi	15
III. METODE PENELITIAN	18
3.1. Lokasi Penelitian	18
3.2. Alat dan Bahan	18
3.3. Metode Pengambilan Data	18

3.3.1. Persiapan Sampel	18
3.3.2. Proses Gasifikasi	19
3.4. Analisis Parameter.....	20
3.4.1. Analisis <i>Syngas</i>	20
3.4.2. Analisis <i>Lower Heating Value</i>	22
3.4.3. Analisis Proksimat	22
3.4.3.1. Kadar Air.....	23
3.4.3.2. Zat Terbang	23
3.4.3.3. Kadar Abu	23
3.4.3.4. Karbon Terikat	24
3.5. Analisis Data	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1. Analisis Komposisi <i>Syngas</i>	25
4.1.1. Karbon Monoksida (CO)	25
4.1.2. Karbon Dioksida (CO ₂).....	27
4.1.3. Metana (CH ₄)	28
4.1.4. Hidrogen (H ₂).....	29
4.1.5. Oksigen (O ₂)	30
4.1.6. Analisis <i>Lower Heating Value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	31
4.2. Analisis Proksimat Pelet Bambu Betung dan <i>Ash (by-product)</i> Gasifikasi.....	33
4.2.1. Kadar Air.....	34
4.2.2. Kadar Zat Terbang	36
4.2.3. Kadar Abu	37
4.2.4. Karbon Terikat	39
4.3. Potensi <i>Syngas</i> Pelet Bambu Betung (<i>Dendrocalamus asper</i>) sebagai Alternatif Energi Terbarukan	40
V. KESIMPULAN DAN SARAN	42
5.1. Kesimpulan.....	42
5.2. Saran.....	43

DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian.....	6
2. Berbagai tipe <i>gasifier</i> , <i>fixed bed</i> : (A) <i>updraft gasifier</i> , (B) <i>downdraft gasifier</i> , (C) <i>fluidized bed</i> ; (D) <i>entrained bed</i>	13
3. Pelet bambu betung (<i>Dendrocalamus asper</i>).....	19
4. <i>Feedstock</i>	19
5. Generator.....	19
6. Sakelar reaktor	20
7. Corong di zona pembakaran pada reaktor.....	20
8. Tampilan layar pada reaktor.....	20
9. Katup penghubung (A); <i>gas analyzer conditioning</i> (B).....	21
10. <i>Outlet</i> pada <i>gas analyzer conditioning</i> (A); <i>gas inlet port</i> pada <i>Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P</i>	21
11. Tampilan <i>Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P</i> saat merekam.....	22
12. Tampilan aplikasi <i>gas analyzer</i>	22
13. Grafik persentase kandungan karbon monoksida (CO).	26
14. Grafik persentase kandungan karbon dioksida (CO ₂).	27
15. Grafik persentase kandungan metana (CH ₄).	28
16. Grafik persentase kandungan hidrogen (H ₂).	30
17. Grafik persentase kandungan oksigen (O ₂).	31
18. Grafik nilai LHV pada hasil gasifikasi pelet bambu betung.	32
19. Grafik perbandingan kadar air pelet bambu betung dengan <i>ash</i> (<i>by-product</i>).	35
20. Grafik perbandingan kadar zat terbang pelet bambu betung dengan <i>ash</i> (<i>by-</i>	

<i>product</i>).....	36
21. Grafik perbandingan kadar abu pelet bambu betung dengan <i>ash</i> (<i>by-product</i>).	38
22. Grafik perbandingan karbon terikat pelet bambu betung dengan <i>ash</i> (<i>by-product</i>).....	39

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi <i>syngas</i> hasil gasifikasi pelet bambu betung	25
2. Nilai kalor (LHV) pada hasil gasifikasi pelet bambu betung.....	32
3. Nilai proksimat pelet bambu betung dan <i>by-product</i>	34

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Krisis energi global yang semakin mengkhawatirkan telah mendorong berbagai negara untuk mengeksplorasi dan mengembangkan sumber energi alternatif yang terbarukan. Ketergantungan dunia pada bahan bakar fosil tidak hanya menimbulkan masalah ketersediaan yang semakin menipis, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global (Bhattacharya *et al.*, 2021). Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2023, sekitar 85% kebutuhan energi nasional masih bergantung pada energi fosil, yang tidak hanya menyebabkan ketidakstabilan pasokan tetapi juga memperparah emisi gas rumah kaca (ESDM, 2023). Penggunaan energi fosil berkontribusi terhadap peningkatan CO₂ sebesar 33,1 Gt pada tahun 2022, yang mempercepat perubahan iklim dan pemanasan global (IEA, 2023). Selain itu, cadangan energi fosil di Indonesia terus menipis, dengan perkiraan minyak bumi hanya mampu bertahan 9,5 tahun dan gas alam 22,3 tahun pada tingkat produksi saat ini (ESDM, 2023). Oleh karena itu, diperlukan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Biomassa telah diidentifikasi sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan karena sifatnya yang dapat diperbarui dalam waktu relatif singkat dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Biomassa didefinisikan sebagai bahan biologis yang berasal dari organisme hidup, termasuk tanaman dan hewan, yang dapat dikonversi menjadi energi melalui berbagai proses termokimia atau biokimia (Kumar *et al.*, 2022). Dalam konteks energi terbarukan, biomassa tanaman menjadi fokus utama karena ketersediaannya yang melimpah dan kemampuannya menyerap karbon dioksida selama pertumbuhannya, sehingga

berpotensi menciptakan siklus karbon yang hampir netral ketika digunakan sebagai bahan bakar (Widyastuti dan Prasetyo, 2023). Berbagai jenis biomassa, mulai dari limbah pertanian, residu kehutanan, hingga tanaman budidaya, tersedia dalam jumlah melimpah di berbagai wilayah Indonesia (Santoso *et al.*, 2020). Meskipun demikian, pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi di Indonesia masih belum optimal dan memerlukan identifikasi jenis biomassa yang paling efektif dan efisien untuk dikonversi menjadi energi. Salah satu jenis tanaman yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku gasifikasi adalah bambu, khususnya bambu betung.

Bambu betung (*Dendrocalamus asper*) merupakan salah satu jenis bambu unggulan di Indonesia yang memiliki potensi besar sebagai bahan baku biomassa energi. Bambu betung dikenal sebagai Hasil Hutan Bukan Kayu (HHBK) multifungsi yang telah lama dimanfaatkan dalam berbagai sektor, mulai dari konstruksi, kerajinan, hingga bahan baku industri (Wulandari, 2019; Aristri *et al.*, 2024; Febrian *et al.*, 2025). Bambu betung memiliki karakteristik pertumbuhan yang baik pada ketinggian 0–2.000 meter di atas permukaan laut dan dapat tumbuh optimal pada tanah yang subur dengan iklim yang tidak terlalu kering (Senjaya *et al.*, 2024). Bambu betung berumur tujuh tahun rata-rata memiliki tinggi 7,23 meter dan diameter batang 7,12 cm per rumpun, dengan jumlah batang dewasa 6,01 batang per rumpun (Hani *et al.*, 2024). Pada pola agroforestri tertentu, pertumbuhan tinggi dapat mencapai 8,49 meter, diameter 7,17 cm, dan berat total batang mencapai 21,31 kg per batang (Hani *et al.*, 2024; Nadeak *et al.*, 2014; Winarno *et al.*, 2025). Karakteristik pertumbuhan yang cepat ini menjadikan bambu betung sebagai sumber biomassa yang sangat menjanjikan untuk pengembangan energi terbarukan. Kandungan selulosa pada bambu betung berkisar antara 42,8% hingga 53,6%, yang merupakan polisakarida utama pembentuk serat dan sumber energi penting dalam biomassa, memberikan kekuatan mekanik dan kestabilan struktural pada bambu (Rulianah *et al.*, 2024; Maulana *et al.*, 2021). Selanjutnya, kandungan lignin berada pada kisaran 19,8% hingga 26,6%, sehingga menjadikannya bahan baku yang ideal untuk proses gasifikasi (Rulianah *et al.*, 2024).

Gasifikasi biomassa merupakan salah satu teknologi konversi termokimia yang dapat mengubah biomassa padat menjadi gas yang mampu bakar (*syngas*) melalui proses oksidasi parsial pada suhu tinggi (800-1000°C). *Syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi terutama terdiri dari campuran gas karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan nitrogen (N₂), yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik, bahan bakar mesin, atau sebagai bahan baku industri kimia (Okoroigwe dan Saffron, 2021). Dibandingkan dengan proses pembakaran langsung, gasifikasi menawarkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi serta potensi pengurangan emisi polutan yang signifikan (Li *et al.*, 2020; Nabila *et al.*, 2023).

Efektivitas gasifikasi biomassa dipengaruhi oleh berbagai parameter, baik yang berkaitan dengan karakteristik bahan baku maupun kondisi operasi proses gasifikasi. Karakteristik bahan baku yang penting untuk dipertimbangkan meliputi komposisi kimia, nilai kalor, kadar air, kadar abu, dan ukuran partikel (Wahyudi *et al.*, 2022). Sementara itu, kondisi operasi yang dapat memengaruhi efektivitas gasifikasi meliputi suhu, tekanan, waktu tinggal, dan rasio udara/bahan bakar (Nurfauzi *et al.*, 2020). Kualitas *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi sangat menentukan aplikasi dan efisiensi penggunaannya pada tahap selanjutnya. *Syngas* dengan kandungan gas mampu bakar (CO, H₂, dan CH₄) yang tinggi dan nilai kalor yang memadai diperlukan untuk aplikasi pembangkit listrik atau mesin pembakaran internal (Imran *et al.*, 2021). Di sisi lain, aplikasi *syngas* sebagai bahan baku industri kimia mungkin memerlukan komposisi yang berbeda dengan rasio H₂/CO yang spesifik. Oleh karena itu, karakterisasi komposisi *syngas* yang dihasilkan dari gasifikasi pelet bambu betung serta identifikasi kondisi operasi yang optimal untuk menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang diinginkan menjadi aspek penting yang perlu diteliti.

Proses gasifikasi umumnya dilakukan dalam reaktor yang disebut *gasifier*, yang memiliki beberapa tipe berdasarkan arah aliran bahan baku dan gas pembentuknya, yaitu *downdraft*, *updraft*, *fluidized bed*, dan *entrained flow* (Pratiwi, 2020). Di antara jenis-jenis tersebut, reaktor gasifikasi tipe *downdraft* menjadi pilihan populer dalam skala kecil hingga menengah karena menghasilkan *syngas* dengan kandungan tar yang lebih rendah, sehingga lebih bersih dan efisien

untuk digunakan dalam aplikasi pembakaran langsung maupun sebagai bahan baku industri (Puspita *et al.*, 2024; Hutasoit *et al.*, 2025).

Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan pengetahuan mengenai karakteristik gasifikasi pelet bambu, mengidentifikasi kondisi operasi yang optimal untuk menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang diinginkan, serta memberikan landasan ilmiah bagi pengembangan teknologi gasifikasi biomassa yang lebih efisien dan berkelanjutan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimia pelet bambu betung yang digunakan sebagai bahan baku gasifikasi?
2. Bagaimana kualitas *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi pelet bambu betung ditinjau dari komposisi gas dan nilai kalornya?
3. Bagaimana efisiensi konversi energi dalam proses gasifikasi pelet bambu betung menggunakan *downdraft gasifier*?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis komposisi gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan dari gasifikasi pelet bambu betung menggunakan *downdraft gasifier*.
2. Menganalisis nilai *Lower Heating Value* (LHV) *syngas* hasil gasifikasi pelet bambu betung.
3. Menganalisis karakteristik pelet bambu betung dan *biochar* yang dihasilkan sebagai produk samping dari proses gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier*.

1.4. Manfaat Penelitian

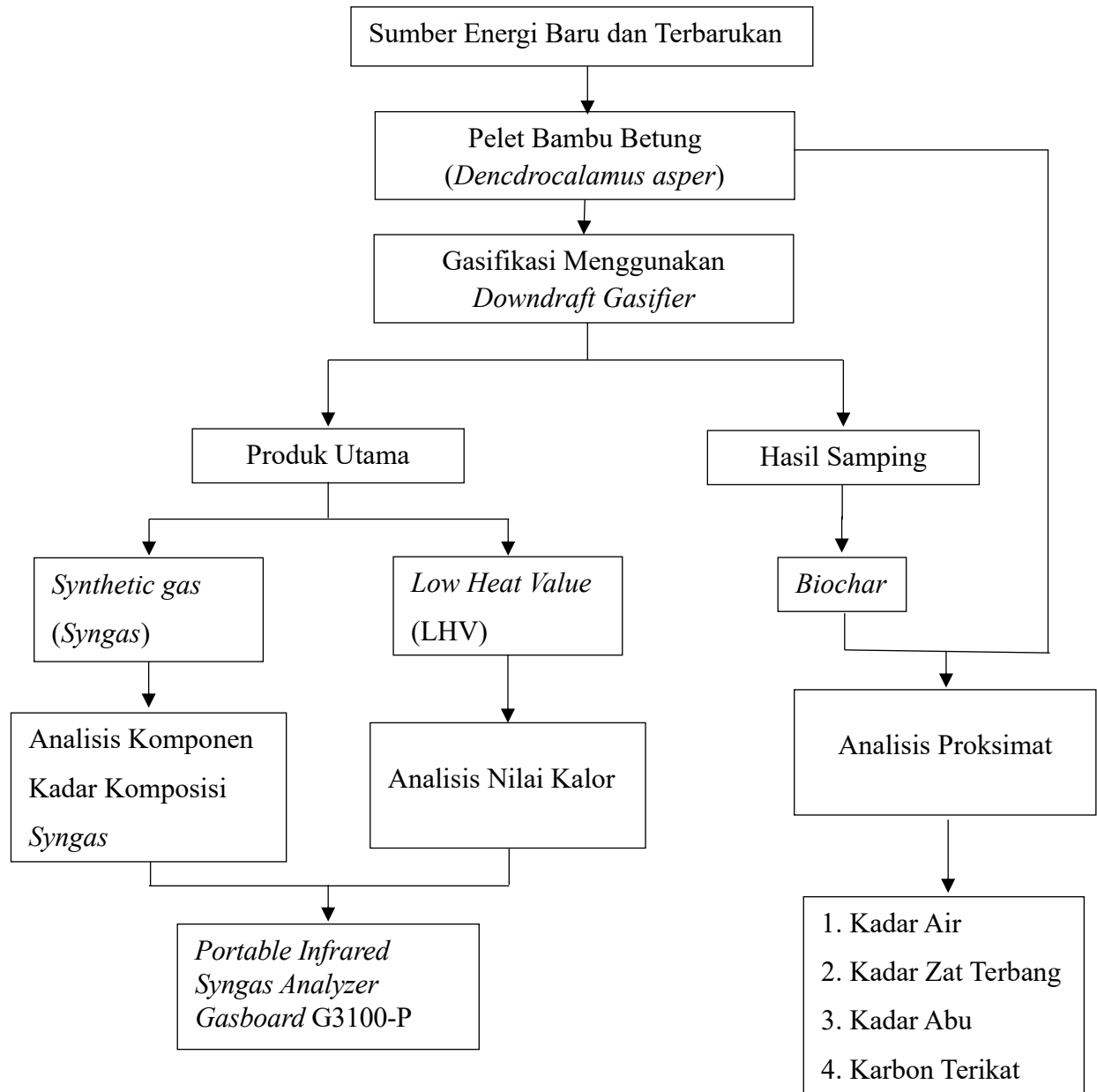
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyediakan data empiris tentang karakteristik dan efektivitas gasifikasi

- pelet bambu betung.
2. Membuka peluang pemanfaatan bambu betung sebagai sumber energi alternatif.
 3. Memberikan informasi teknis tentang optimasi proses gasifikasi pelet bambu betung.

1.5. Kerangka Pemikiran

Pemanfaatan bambu betung sebagai sumber energi baru dan terbarukan melalui gasifikasi pelet bambu menggunakan *downdraft gasifier*. Proses dimulai dari pengolahan biomassa bambu betung yang diubah menjadi pelet melalui proses densifikasi, menghasilkan pelet berbentuk silinder dengan diameter yang konsisten. Pelet ini kemudian digunakan sebagai *feedstock* dalam *downdraft gasifier* melalui serangkaian tahapan termokimia, mulai dari pengeringan, pirolisis, oksidasi, hingga reduksi. Bambu diubah menjadi *syngas* sebagai produk utama. Selama proses gasifikasi, selain *syngas*, juga dihasilkan produk samping berupa tar dan *biochar* yang masing-masing memiliki potensi untuk diolah lebih lanjut, baik sebagai bahan baku pengolahan limbah maupun sebagai amandemen tanah. Akhirnya, kualitas *syngas* dianalisis menggunakan alat spektrometri, seperti *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P*, untuk memastikan efisiensi konversi energi serta menentukan komposisi ideal produk. Kerangka pemikiran penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian.

1.6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis yang diduga dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sifat pelet bambu betung yang membuatnya cocok sebagai bahan bakar untuk gasifikasi.
2. Produk dari gasifikasi *syngas* pelet bambu betung adalah CH_4 , H_2 , dan CO .
3. Efisiensi gasifikasi dipengaruhi oleh *air-fuel ratio* (AFR).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa Sebagai Energi Terbarukan

Biomassa, yang berasal dari bahan organik seperti tanaman, residu hutan, limbah pertanian, dan sampah organik, kini menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang semakin mendapat perhatian penting dalam upaya transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Berbeda dengan energi fosil yang terbatas, biomassa menawarkan keunikan sebagai sumber energi yang dapat diperbarui secara berkelanjutan melalui siklus alami fotosintesis, di mana tanaman menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan mengubahnya menjadi energi kimia yang tersimpan (Ali dan Little, 2024). Karakteristik ini menjadikan biomassa sebagai sumber energi dengan potensi netralitas karbon, asalkan dikelola dengan prinsip-prinsip keberlanjutan yang ketat (Jahiding, 2024).

Dalam konteks global, biomassa telah menjadi komponen terbesar dalam bauran energi terbarukan, menyumbang sekitar 55% dari total konsumsi energi terbarukan dunia pada tahun 2023 dan diproyeksikan mencapai 1.250 TWh untuk pembangkit listrik pada tahun 2030 (Gronwald dan Wang, 2024). Ketersediaan biomassa yang melimpah di berbagai belahan dunia, mulai dari hutan dan residu kayu, biomassa pertanian seperti sekam padi dan jerami gandum, hingga limbah perkebunan tropis seperti tandan kosong kelapa sawit, yang dapat dikonversi menjadi biogas, memberikan fleksibilitas yang tidak dimiliki oleh sumber energi terbarukan lainnya (Putrika, 2023).

Secara fisik dan kimia, biomassa unik ini sangat cocok untuk berbagai teknologi konversi energi. Komposisi lignoselulosa biomassa yang terdiri dari selulosa (35-45%), hemiselulosa (20-30%), dan lignin (15-30%) memberikan nilai kalor yang kompetitif, dengan kandungan *volatile matter* yang tinggi (60-80%) yang memfasilitasi proses konversi termokimia seperti gasifikasi dan pirolisis

(Barakat *et al.*, 2023). Nilai kalor biomassa yang mencapai 15-21 MJ/kg, khususnya setelah melalui proses torrefaksi, menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan sebagai alternatif bahan bakar fosil (Praevia dan Widayat).

Keunggulan biomassa semakin nyata melalui diversifikasi teknologi konversinya. Pembakaran langsung dan *co-firing* biomassa 3-10% massa di boiler batubara eksisting terbukti dapat menurunkan emisi CO₂ dan SO₂ tanpa penurunan efisiensi yang signifikan (Hasan *et al.*, 2025). Teknologi gasifikasi, khususnya dengan sistem *downdraft*, mampu menghasilkan *syngas* dengan tar rendah (<100 mg/Nm³) yang cocok untuk aplikasi skala kecil hingga menengah (Zahro *et al.*, 2023).

2.2. Bambu Betung

Indonesia memiliki kekayaan jenis bambu yang luar biasa dengan sekitar 160 jenis bambu yang tersebar di berbagai wilayah Nusantara. Dari jumlah tersebut, sebanyak 38 jenis merupakan bambu endemik yang hanya tumbuh di Indonesia (Ritonga *et al.*, 2020). Bambu betung (*Dendrocalamus asper*) adalah salah satu spesies bambu berukuran besar yang termasuk dalam famili *Poaceae* (*Gramineae*) (Sujarwanta dan Zen, 2020). Spesies ini memiliki berbagai nama lokal di Indonesia, seperti bambu betung, buluh petung (Melayu), bulu botung (Batak), dan oloh otong (Gayo) (Dewi, 2020).

Distribusi geografis bambu betung cukup luas, meliputi kawasan Asia Tenggara seperti Filipina, Laos, Malaysia, Myanmar, Papua Nugini, Singapura, Thailand, dan Vietnam (Wicaksono *et al.*, 2023). Di Indonesia, spesies ini dapat ditemukan di seluruh pulau besar termasuk Jawa, Kalimantan, Kepulauan Nusa Tenggara, Maluku, Papua, Sulawesi, dan Sumatra (Wulandari, 2021). Klasifikasi ilmiah spesies bambu betung adalah sebagai berikut.

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta (Tumbuhan berbunga)
Kelas	: Liliopsida (Monokotil)
Ordo	: Poales
Famili	: Poaceae (Gramineae)
Subfamili	: Bambusoideae

Genus : *Dendrocalamus*

Spesies : *Dendrocalamus asper*

Pemanfaatan bambu betung sebagai biomassa energi memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan tanaman lain. Menurut Minsas *et al.* (2022), bambu betung memiliki laju pertumbuhan yang sangat cepat, mencapai 30-100 cm per hari dalam kondisi optimal, sehingga dapat dipanen dalam waktu 3-5 tahun. Selain itu, bambu betung memiliki kemampuan regenerasi yang tinggi karena dapat tumbuh kembali setelah dipotong tanpa perlu penanaman ulang, sehingga menjadikannya sumber biomassa yang berkelanjutan (Suri *et al.*, 2025).

Dari komposisi kimianya, bambu betung mengandung komponen-komponen utama berupa selulosa (40-50%), hemiselulosa (25-30%), dan lignin (15-20%) yang berpotensi dikonversi menjadi energi (Tumonglo *et al.*, 2020). Kandungan selulosa dan hemiselulosa yang tinggi pada bambu menjadikannya bahan baku yang baik untuk dikonversi menjadi biomassa bakar. Selain itu, kadar abu yang relatif rendah (1-3%) serta kandungan kalium dan silika yang moderat membuat bambu ini memiliki karakteristik pembakaran yang baik (Wibowo *et al.*, 2020).

Bambu juga berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim. Menurut Irundu *et al.* (2024), kebun bambu dapat menyerap karbon dioksida sekitar 5-12 ton CO₂ per hektar per tahun, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa jenis pohon lain. Dengan demikian, pemanfaatan bambu betung sebagai sumber biomassa energi tidak hanya memberikan manfaat dalam diversifikasi energi, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca. Walaupun demikian, terdapat beberapa tantangan dalam pemanfaatan biomassa bambu, di antaranya kandungan kelembaban tinggi pada bambu segar yang dapat mencapai 50-60% (Haqiqi, 2023). Kondisi ini menyebabkan perlunya proses pengeringan sebelum bambu dapat digunakan sebagai bahan bakar biomassa yang efisien. Selain itu, kepadatan energi bambu dalam bentuk aslinya relatif rendah, sehingga diperlukan teknologi densifikasi seperti pembuatan pelet.

2.3. Pelet Bambu

Pembuatan pelet merupakan salah satu metode densifikasi biomassa yang dapat meningkatkan densitas energi, memperbaiki karakteristik pembakaran, serta memudahkan penanganan dan penyimpanan biomassa bambu (Firdhaus *et al.*, 2023; Haryanto *et al.*, 2021b). Pelet bambu adalah produk biomassa padat berbentuk silinder kecil dengan diameter umumnya berkisar antara 6-12 mm dan panjang 10-30 mm yang dihasilkan melalui proses pemadatan biomassa bambu di bawah tekanan tinggi (Alpian *et al.*, 2023). Proses pembuatan pelet bambu melibatkan beberapa tahapan utama, yakni persiapan bahan baku (pengeringan dan penggilingan), pencampuran, peletisasi, pendinginan, dan pengemasan (Alpian *et al.*, 2023; Rani *et al.*, 2020). Menurut (Alpian *et al.*, 2023), faktor-faktor yang memengaruhi kualitas pelet bambu meliputi ukuran partikel, kadar air bahan baku, tekanan peletisasi, suhu proses, dan waktu penekanan.

Pelet bambu yang diproduksi dengan tekanan 200 MPa dan suhu 120°C memiliki densitas rata-rata 1,2 g/cm³, jauh lebih tinggi dibandingkan biomassa bambu asli yang hanya berkisar 0,3 g/cm³ (Haryanto *et al.*, 2023). Peningkatan densitas ini berdampak positif pada peningkatan densitas energi dan efisiensi transportasi, di mana 1 m³ pelet bambu setara dengan 3-4 m³ serpihan bambu kering.

Karakteristik fisik dan kimiawi pelet bambu sangat bergantung pada jenis bambu dan metode pembuatannya. Dari segi durabilitas, pelet bambu memiliki indeks ketahanan mekanis yang baik, dengan nilai ketahanan terhadap abrasi mencapai 97,5% setelah pengujian drum selama 10 menit (Tambunan *et al.*, 2023; Sulistio *et al.*, 2020). Ketahanan ini sangat penting untuk menjaga integritas pelet selama transportasi dan penyimpanan. Penambahan bahan pengikat (*binder*) dalam pembuatan pelet telah diteliti untuk meningkatkan kualitas pelet yang dihasilkan. Penambahan pati sebesar 3-5% dapat meningkatkan kuat tekan dan durabilitas pelet bambu secara signifikan (Nugraha *et al.*, 2024). Sementara itu, Putri *et al.* (2023) menyimpulkan bahwa penggunaan tepung tapioka sebagai binder pada konsentrasi 10% menghasilkan pelet bambu dengan karakteristik optimal, termasuk peningkatan nilai kalor dan penurunan kadar abu.

Penggunaan pelet bambu sebagai bahan bakar memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan biomassa lainnya. Andrianto *et al.* (2023) mengatakan bahwa pelet bambu memiliki emisi yang lebih rendah dibandingkan batubara, dengan reduksi emisi SO₂ mencapai 90% dan NO_x sebesar 50%. Selain itu, penggunaan pelet bambu dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 80% dibandingkan dengan bahan bakar fosil, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan (Andrianto *et al.*, 2023). Siddik (2023) mengatakan bahwa investasi dalam teknologi peletisasi bambu memiliki *payback period* sekitar 2,5 tahun dengan IRR (*Internal Rate of Return*) mencapai 25%, menunjukkan prospek ekonomi yang menjanjikan bagi pengembangan industri pelet bambu di Indonesia.

2.4. Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses konversi termokimia yang mengubah biomassa padat menjadi gas mampu bakar (*combustible gas*) melalui reaksi oksidasi parsial pada suhu tinggi. Proses ini berlangsung dengan ketersediaan oksigen yang terbatas, biasanya sekitar 20-30% dari kebutuhan stoikiometri untuk pembakaran sempurna (Suliono *et al.*, 2020). Gasifikasi ini merupakan bentuk peningkatan energi yang terkandung dalam biomassa melalui konversi bahan padat menjadi gas (*syngas*) dengan menggunakan proses termokimia (degradasi termal) terhadap bahan-bahan organik pada suhu tinggi dan tekanan udara yang dimampatkan (Nurulhuda, 2022). Gasifikasi biomassa, termasuk pelet bambu, menghasilkan produk utama berupa gas sintetis atau *syngas* yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi energi.

Proses gasifikasi melibatkan beberapa tahapan reaksi yang berlangsung secara simultan maupun berurutan, yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Menurut Lestari *et al.* (2020), tahap pengeringan terjadi pada suhu sekitar 100–200 °C, ketika kelembapan dalam biomassa diuapkan. Pada tahap pirolisis (200–700 °C), biomassa terdekomposisi secara termal dan menghasilkan *char*, tar, serta gas ringan. Pada tahap oksidasi (700–1200 °C), sebagian produk pirolisis teroksidasi menghasilkan CO₂ dan H₂O serta panas yang diperlukan untuk keseluruhan proses. Akhirnya, pada tahap reduksi (800-1000°C), CO₂ dan H₂O

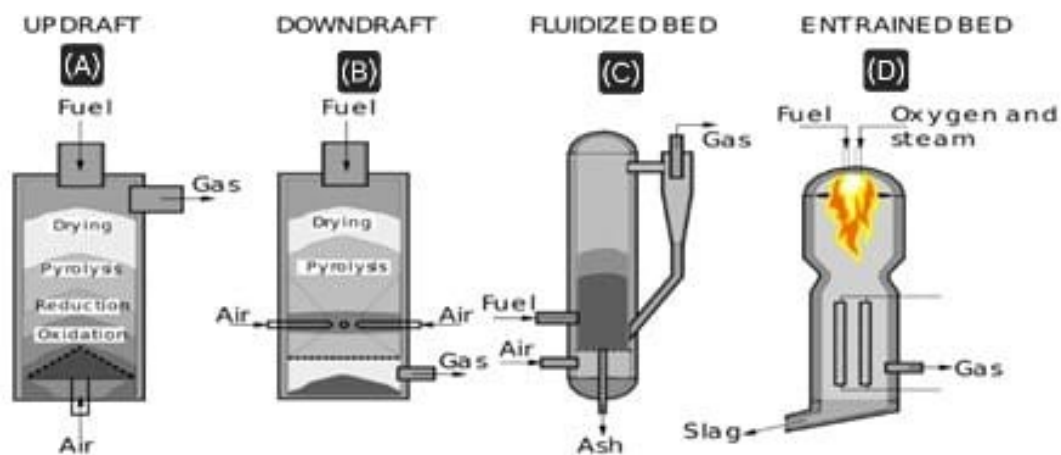
bereaksi dengan *char* untuk membentuk CO dan H₂, yang merupakan komponen utama *syngas* (Lestari *et al.*, 2020).

Agen gasifikasi berperan penting dalam menentukan komposisi dan kualitas *syngas* yang dihasilkan. *Gasifying agent* yang umum digunakan adalah udara, uap air, dan oksigen. Dari ketiga media tersebut, yang paling banyak memproduksi hidrogen dari *syngas* adalah uap air, kemudian disusul oleh oksigen dan udara (Fadhilla dan Nazarudin, 2023). Berdasarkan *gasifying agent* tersebut, rasio media gasifikasi terhadap biomassa yang digunakan juga dapat memengaruhi produksi hidrogen dalam *syngas* pada temperatur tertentu.

Parameter operasional lain yang memengaruhi proses gasifikasi adalah laju aliran udara, yaitu kebutuhan udara masuk untuk gasifikasi lebih kecil daripada kebutuhan udara stoikiometri (pembakaran sempurna). Jumlah udara pada proses gasifikasi sangat tergantung pada reaksi pembakaran masing-masing unsur yang terdapat dalam satuan massa bahan bakar dengan udara secara sempurna dan *Equivalent Ratio* (Rionaldo, 2021).

2.5. *Gasifier*

Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam reaktor gasifikasi yang dikenal sebagai *gasifier*. *Gasifier* merupakan reaktor tempat berlangsungnya proses gasifikasi yang mengonversi biomassa padat menjadi gas mampu bakar. Desain dan konfigurasi *gasifier* sangat memengaruhi efisiensi konversi, komposisi *syngas* yang dihasilkan, serta kinerja keseluruhan sistem gasifikasi (Saputro *et al.*, 2023). Berdasarkan arah aliran bahan bakar dan agen gasifikasi, *gasifier* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis utama: *fixed bed* (*updraft* dan *downdraft*), *fluidized bed*, dan *entrained flow*. Jenis utama *gasifier* dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Berbagai tipe *gasifier, fixed bed*: (A) *updraft gasifier*, (B) *downdraft gasifier*, (C) *fluidized bed*; (D) *entrained bed* (Zahro *et al.*, 2023).

Downdraft gasifier merupakan salah satu jenis reaktor yang umumnya digunakan untuk pemanasan skala kecil dan aplikasi daya. *Gasifier* tipe *downdraft* telah banyak dikembangkan di Indonesia karena desainnya yang relatif sederhana serta menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang lebih baik (Amrullah dan Oktaviananda, 2022). Pada *downdraft gasifier*, arah aliran udara dan bahan baku mengalir ke bawah. Gasifikasi jenis ini menghasilkan tar yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis *updraft*. Hal ini dikarenakan tar hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke daerah gasifikasi dan pembakaran yang memiliki temperatur tinggi (Setyawan *et al.*, 2021). Pada daerah gasifikasi dan pembakaran inilah tar akan terurai. Hasil gas dari sistem gasifikasi *downdraft* ini, setelah disaring dan didinginkan, dapat langsung dimasukkan ke dalam mesin pembakaran dalam atau ditampung dalam wadah untuk diuji atau dianalisis komposisinya.

Untuk aplikasi skala menengah dan besar, *gasifier* tipe *fluidized bed* menunjukkan potensi yang menjanjikan. *Gasifier bubbling fluidized bed* dengan kapasitas 50 kg/jam menunjukkan efisiensi konversi karbon mencapai 90% dengan fleksibilitas tinggi terhadap variasi bahan baku biomassa (Kong *et al.*, 2022). *Gasifier fluidized bed* juga menunjukkan distribusi suhu yang lebih merata dan kontrol yang lebih baik, meskipun konstruksinya lebih kompleks dibandingkan dengan *fixed bed*.

Sistem pembersihan *syngas* merupakan komponen integral dari *gasifier* untuk menghasilkan *syngas* yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi hilir seperti

mesin pembakaran internal atau sintesis bahan bakar. Pada *gasifier* tipe *downdraft*, biomassa harus sangat kering ($< 20\%$ kadar air) (Amrullah dan Oktaviananda). *Syngas* panas harus didinginkan, dan kompresi atau unit pembersihan gas yang ekstensif diperlukan.

2.6. *Synthetic gas (Syngas)*

Syngas (synthetic gas) merupakan produk utama dari proses gasifikasi biomassa, termasuk pelet bambu, yang terdiri dari campuran gas-gas yang mampu bakar terutama karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂), serta komponen lain seperti metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan nitrogen (N₂) dalam jumlah yang bervariasi tergantung pada kondisi proses dan agen gasifikasi yang digunakan (Al-Insayrah *et al.*, 2025). *Syngas* memiliki nilai strategis karena dapat dimanfaatkan langsung sebagai bahan bakar atau sebagai bahan baku untuk sintesis berbagai bahan kimia dan bahan bakar cair.

Syngas memiliki batas mudah terbakar (*flammability limits*) yang menandakan kemampuan api untuk membakar gas. Bahan bakar, arah penyebaran, ukuran dan bentuk ruang bakar, suhu, serta tekanan sangat berpengaruh terhadap batas mudah bakar (Su *et al.*, 2025). *Syngas* yang sangat baik adalah *syngas* yang dapat menghasilkan banyak H₂ dan CO, karena jelas bahwa kedua elemen ini merupakan elemen utama yang akan meningkatkan kemampuan bahan bakar. Di sisi lain, kemampuan bahan bakar campuran *syngas* akan berkurang jika mengandung komponen lain seperti nitrogen dan karbon dioksida. Oleh karena itu, produksi karbon dioksida dan nitrogen harus dijaga seminimal mungkin.

Karbon monoksida (CO) adalah gas yang dihasilkan oleh pembakaran yang tidak sempurna. Gas ini terdapat di berbagai lingkungan, termasuk emisi industri, asap rokok, knalpot kendaraan, dan area permukiman. Karbon monoksida adalah kontaminan umum yang berdampak negatif pada kesehatan manusia. Karena karbon monoksida merupakan unsur yang juga terdapat dalam komposisi *syngas*, perlu dikurangi, dan konstituen gas lainnya harus diprioritaskan, terutama gas hidrogen yang menyusun *syngas* tersebut, yaitu gas

hidrogen (H_2). Oleh karena itu, kandungan hidrogen dalam *syngas* harus dioptimalkan.

Ada juga hal-hal yang memengaruhi komposisi *syngas*, salah satunya temperatur. Temperatur optimum yang digunakan dalam proses gasifikasi biomassa adalah sekitar 1000 K atau 700–900 °C untuk produksi hidrogen dalam *syngas* (Putri *et al.*, 2021). Pengaruh lain yang dapat meningkatkan kandungan hidrogen dalam *syngas* adalah agen gasifikasi (*gasifying agent*) yang digunakan. *Gasifying agent* yang umum digunakan adalah udara, uap air, dan oksigen. Dari ketiga media tersebut, yang paling banyak menghasilkan hidrogen dari *syngas* adalah uap air, diikuti oleh oksigen dan udara.

Sistem pembersihan dan pemurnian *syngas* terdiri daripada beberapa tahapan. Pembersihan primer umumnya menggunakan *cyclone* untuk menghilangkan partikulat besar ($>10\ \mu m$) (Hutasuhut *et al.*, 2024). Pembersihan sekunder melibatkan *wet scrubber* atau *venturi scrubber* untuk menangkap tar dan partikulat halus. Pemurnian lebih lanjut dapat dilakukan menggunakan filter fabric, filter keramik, atau teknologi katalitik untuk menghasilkan *syngas* berkualitas tinggi (Sharma *et al.*, 2021).

Pemanfaatan *syngas* sangat beragam, meliputi pembakaran langsung untuk aplikasi termal, bahan bakar mesin pembakaran internal untuk pembangkit listrik, hingga bahan baku untuk sintesis kimia. Untuk pembangkitan listrik skala kecil ($<100\ kW$), penggunaan *syngas* pada mesin pembakaran internal dapat menghasilkan efisiensi konversi listrik sekitar 15-25% dengan konsumsi spesifik biomassa sekitar 1,0-1,5 kg/kWh (Ferreira *et al.*, 2022). Selain untuk pembangkit listrik, *syngas* juga dapat dimanfaatkan untuk aplikasi termal, seperti pengeringan dan pemanasan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Firdaus *et al.* (2021), *syngas* dari gasifikasi 1 kg pelet bambu dapat menghasilkan energi termal setara dengan 2,5-3,0 kWh, yang cukup untuk mengeringkan 10-15 kg produk pertanian dengan kadar air awal 70-80% menjadi 10-15%.

2.7. Hasil Samping Gasifikasi

Selain produk utama berupa *syngas*, proses gasifikasi biomassa juga menghasilkan berbagai hasil samping dengan karakteristik dan potensi

pemanfaatan yang beragam. Hasil samping gasifikasi biomassa umumnya terdiri dari tar, abu (*ash*), dan *biochar*, yang masing-masing memiliki karakteristik fisikokimia yang berbeda dan memerlukan penanganan khusus untuk mengoptimalkan proses.

Tar merupakan salah satu hasil samping yang paling kritis dalam proses gasifikasi biomassa. Hambatan terbesar dalam komersialisasi teknologi gasifikasi biomassa adalah penghilangan tar dari biomassa (Santana *et al.*, 2025).

Kandungan tar dalam *syngas* dapat menjadi masalah karena dapat menyebabkan penyumbatan pada sistem *downstream* dan menurunkan efisiensi proses (Saputra, 2020). Tar biomassa memiliki struktur molekul yang kompleks dan bervariasi, tergantung pada kondisi proses gasifikasi. Komposisi tar dapat mencakup senyawa fenolik, benzena, toluena, naftalena, serta senyawa aromatis polisiklik lainnya (Santana *et al.*, 2025).

Abu merupakan residu anorganik yang tersisa setelah proses gasifikasi biomassa dan memiliki komposisi yang bervariasi tergantung pada jenis biomassa (Pratiwi *et al.*, 2025). Abu adalah produk samping dari gasifikasi biomassa yang terutama terdiri dari bahan anorganik yang tersisa setelah kandungan volatil biomassa yang dibakar. Secara umum, biomassa pertanian memiliki lebih banyak abu, sedangkan biomassa kehutanan mengandung lebih sedikit abu dibandingkan dengan sekam padi, yang dapat mengandung hingga 10% abu (Rulianah *et al.*, 2024). Kandungan abu yang tinggi dapat menyebabkan masalah operasional, seperti *slagging* dan *fouling*, pada sistem gasifikasi (Wibowo dan Windarta, 2020). Melalui aktivitas katalitik mineral yang dimilikinya, abu juga dapat memengaruhi kualitas *syngas* yang dihasilkan. Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 dalam abu dapat berfungsi sebagai katalis untuk reaksi *water-gas shift* dan *steam reforming*, sehingga dapat meningkatkan kandungan hidrogen dalam *syngas* (Waluyo *et al.*, 2022).

Biochar merupakan zat kaya karbon yang dihasilkan dari pirolisis sampah atau limbah organik (biomassa pertanian), pembakaran tidak sempurna, atau pembakaran dengan suplai oksigen yang terbatas (Asmunandar *et al.*, 2023; Haryanto *et al.*, 2021a; Hidayat *et al.*, 2021). *Biochar*, yang sering disebut sebagai arang hayati, terbuat dari biomassa dan mengandung karbon hitam. Arang ini

diproduksi dengan membakar bahan organik dengan kandungan karbon 70-80% pada suhu di bawah 700°C dan dengan sedikit oksigen (Situmeang, 2020). Karena luas permukaannya yang sangat besar dan strukturnya yang berpori, *biochar* dapat digunakan untuk berbagai tujuan, mulai dari pengolahan limbah dan industri hingga sebagai suplemen tanah dan bahan bakar alternatif (Rulianah *et al.*, 2024).

Jenis biomassa asal dan parameter proses pirolisis atau gasifikasi, termasuk suhu dan durasi proses, memiliki dampak signifikan terhadap komposisi kimia dan karakteristik fungsional *biochar* (Asmunandar *et al.*, 2023; Riniarti *et al.*, 2025; Haryanto *et al.*, 2022). *Biochar* yang terbuat dari biomassa yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam jumlah tinggi akan memiliki sifat yang beragam, terutama yang berkaitan dengan nilai kalor, kadar abu, dan kadar karbon (Rulianah *et al.*, 2024; Hidayat *et al.*, 2022; Hidayat *et al.*, 2023; Hidayat *et al.*, 2025). Produksi tanaman yang dibudidayakan dan kualitas tanah dipengaruhi oleh jenis, jumlah, serta sumber *biochar*. Daya serap dan kapasitas tukar kation yang kuat pada bambu menjadikannya salah satu bahan baku yang dapat digunakan untuk menghasilkan *biochar* (Fadilah *et al.*, 2021). Kandungan selulosa, lignin, dan hemiselulosa pada bambu merupakan beberapa komponen kimia yang berkontribusi terhadap produksi *biochar* berkualitas tinggi. (Fadilah *et al.*, 2021). Penelitian oleh Asmunandar *et al.* (2023) menunjukkan bahwa suhu dan waktu pirolisis sangat memengaruhi kualitas *biochar* bambu betung. Pada suhu optimal sekitar 300°C dan waktu 30 menit, *biochar* yang dihasilkan memiliki nilai kalor sebesar 7.249 kkal/kg, kadar air rendah (2,58%), kadar abu 5,23%, dan kadar *volatile matter* 18,71% (Asmunandar *et al.*, 2023). Selain sebagai bahan bakar, *biochar* bambu betung memiliki struktur mikropori yang baik, sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi dan stabilitas kimia. Struktur berpori ini sangat berguna dalam aplikasi pertanian sebagai amandemen tanah untuk meningkatkan kesuburan, kapasitas menahan air, dan penyerapan nutrisi, serta dalam pengolahan limbah sebagai adsorben (Alfiandri *et al.*, 2023; Riniarti *et al.*, 2024; Wijaya *et al.*, 2025b).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari April hingga Desember 2025. Persiapan alat dan bahan, serta pengambilan sampel dan analisis *syngas*, dilakukan di *Workshop* Teknologi Hasil Hutan, Laboratorium Terpadu Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis proksimat dan analisis data dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian berupa pelet bambu betung sebanyak 20 kg, yang didapatkan di Laboratorium Teknologi hasil Hutan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan *biochar* hasil gasifikasi pelet bambu betung. Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain reaktor *downdraft gasifier* 15 kwh, *flame gun*, *portable gas*, biosolar, generator, *portable infrared syngas analyzer gasboard G3100 P*, timbangan analitik, *muffle furnace*, *crucible*, *gas analyzer conditioning*, oven, ember plastik, selang silikon.

3.3. Metode Pengambilan Data

3.3.1. Persiapan Sampel

Pada pelet bambu betung dilakukan penyortiran secara visual untuk menghilangkan pelet yang cacat, pecah, atau berukuran tidak seragam. Pelet yang retak atau hancur dapat memengaruhi kestabilan proses gasifikasi. Pelet yang lolos seleksi memiliki diameter standar antara 6–8 mm dan panjang yang seragam untuk menjaga kestabilan proses gasifikasi. Pelet bambu betung yang telah

disortir sebelumnya mengalami proses pengeringan dalam oven pada suhu 105°C hingga kadar air mencapai 8–12%. Selanjutnya, pelet disimpan pada suhu ruang dengan kelembapan relatif rendah sekitar 40–60% untuk menjaga kestabilan kadar air selama masa penelitian seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*)

3.3.2. Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi pelet bambu Betung dilaksanakan melalui beberapa tahapan dalam reaktor *downdraft gasifier* yang dijelaskan pada Gambar 4-8.

1. Pelet bambu betung sebanyak 20 kg dimasukkan ke dalam *hopper (feedstock)* pada reaktor.



Gambar 4. *Feedstock*

2. Generator kemudian dihidupkan agar reaktor *downdraft gasifier* mendapatkan daya listrik.



Gambar 5. Generator

3. Sakelar daya pada reaktor *downdraft gasifier* kemudian dihidupkan, lalu dipastikan layar display reaktor menunjukkan tekanan aliran udara (*press 1, press 2*) berada pada angka -1 Kpa.



Gambar 6. Sakelar reaktor

4. Pembakaran awal dilakukan secara manual menggunakan *flame gun* pada permukaan pelet bambu betung sebagai pemicu pembakaran di reaktor.



Gambar 7. Corong di zona pembakaran pada reaktor

5. Setelah suhu pada reaktor mencapai 200°C, otomatisasi pada *gasifier* dapat dilakukan.



Gambar 8. Tampilan layar pada reaktor

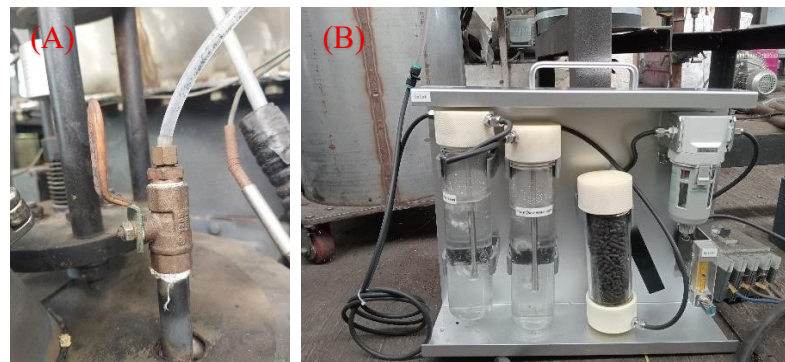
3.4. Analisis Parameter

3.4.1. Analisis Syngas

Analisis *syngas* dilakukan menggunakan *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard (PISAG) G3100-P*. Alat tersebut dapat mengidentifikasi besaran jumlah gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi, yaitu *syngas*.

Gasboard-3100P mampu menganalisis secara simultan berbagai komponen gas utama yang terkandung dalam *syngas*, seperti CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂, serta hidrokarbon lainnya. Analisis ini dapat dilakukan secara langsung atau *real time* dengan bantuan aplikasi *gas analyzer* yang terhubung ke laptop. Alat ini juga dapat merekam data *syngas* yang dianalisis dan menyimpannya di dalam alat tersebut. Perekaman data dapat dilakukan dalam rentang waktu tertentu, dengan durasi minimal 1 detik. Data maksimal yang dapat disimpan adalah 2560. PISAG G3100-P dapat dilihat pada Gambar 11 dan tampilan *gas analyzer* dapat dilihat pada Gambar 12. Adapun tahapan analisis *syngas* menggunakan PISAG G3100-P adalah sebagai berikut, yang disajikan pada Gambar 9 dan 10.

1. Katup aliran gas dari reaktor dibuka dan disambungkan ke selang silikon di sebelah kiri pada *gas analyzer conditioning*.

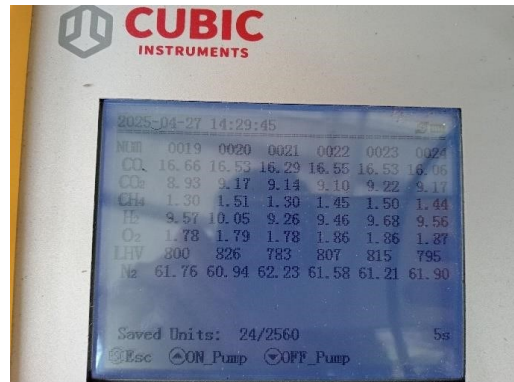


Gambar 9. Katup penghubung (A); *gas analyzer conditioning* (B)

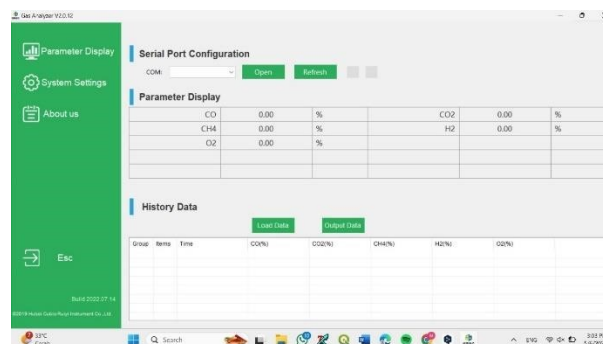
2. Selang silikon (*outlet*) *gas analyzer conditioning* sebelah kanan disambungkan ke selang silikon pada PISAG G3100-P.



Gambar 10. *Outlet* pada *gas analyzer conditioning* (A); *gas inlet port* pada *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P*.



Gambar 11. Tampilan *Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P* saat merekam.



Gambar 12. Tampilan aplikasi gas *analyzer*.

3.4.2. Analisis *Lower Heating Value*

Analisis nilai kalor syngas hasil gasifikasi pelet bambu betung dilakukan untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan dari proses gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier*. Nilai kalor merupakan parameter penting yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan saat pembakaran syngas dan berpengaruh langsung terhadap efisiensi termal proses gasifikasi. Nilai kalor yang ditentukan adalah *Lower Heating Value* (LHV). PISAG G3100-P juga dilengkapi fitur kalkulasi otomatis untuk menentukan nilai kalor syngas, baik *Lower Heating Value* (LHV). Berikut adalah rumus untuk menghitung nilai LHV.

$$\text{LHV (Kcal/m}^3\text{)} = (30,18 \times \text{CO}\%) + (25,76 \times \text{H}_2\%) + (85,78 \times \text{CH}_4\%)$$

3.4.3. Analisis Proksimat

Analisis proksimat digunakan untuk menentukan komposisi dasar bahan bakar padat, termasuk biomassa seperti pelet bambu betung (*Dendrocalamus asper*). Kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu

(*ash content*), dan karbon terikat (*fixed carbon*) merupakan beberapa parameter yang diukur. Efektivitas teknik konversi energi seperti gasifikasi dan kemurnian bahan bakar ditentukan oleh pengujian ini.

3.4.3.1. Kadar Air

Proses penentuan kadar air melibatkan pemanasan bahan untuk menguapkan air yang tersisa hingga kadar air dan kelembapan udara di sekitarnya seimbang. Oven akan digunakan untuk uji kadar air. Satu gram dari setiap bahan digunakan dalam pengujian ini, dan dimasukkan ke dalam cawan terbuka. Selama periode 24 jam atau 1 hari, suhu 100°C digunakan (Asmunandar *et al.*, 2023). Ada tiga kali pengulangan pengujian. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

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

Keterangan :

KA = kadar air (%)

BA = berat awal (%)

BKO = berat kering oven (%)

3.4.3.2. Zat Terbang

Bagian dari bahan yang kehilangan massa ketika dipanaskan tanpa udara dikenal sebagai bahan yang mudah menguap. Sebuah *muffle furnace* akan digunakan untuk uji *volatile matter*. Satu gram dari masing-masing bahan *biochar* dan biomassa-akan digunakan. Cawan porselen dengan penutup diisi dengan bahan tersebut. Gunakan suhu 950°C selama tujuh menit untuk menguji kandungan (Aini *et al.*, 2023). Untuk setiap bahan, dilakukan tiga kali ulangan. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Zat\ Terbang = \frac{Sampel\ setelah\ pemanasan\ (g)}{Sampel\ kering\ (g)} \times 100\%$$

3.4.3.3. Kadar Abu

Kadar abu atau *ash content* merujuk pada persentase mineral yang tidak menguap dan tertinggal sebagai residu setelah proses pembakaran. Sebanyak 1 gram tiap bahan dalam cawan porselen dimasukkan ke dalam *muffle furnace*

dengan suhu 750°C selama 1 jam dan dilakukan 3 kali ulangan (Asmunandar *et al.*, 2023). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

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

3.4.3.4. Karbon Terikat

Karbon terikat atau *fixed carbon* adalah fraksi padat yang tersisa dalam sampel setelah pengurangan kadar air, kadar zat terbang, dan kadar abu. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

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

3.5. Analisis Data

Penelitian ini akan menggunakan analisis data deskriptif. Analisis data deskriptif adalah metode yang digunakan untuk mengolah dan menyajikan data secara sistematis sehingga dapat memberikan gambaran atau penjelasan yang jelas tentang karakteristik data yang dikumpulkan (Subhaktiyasa *et al.*, 2025).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Komposisi *syngas* yang dihasilkan dari gasifikasi pelet bambu betung terdiri atas gas mampu bakar dan gas non-mampu bakar. Gas mampu bakar yang teridentifikasi meliputi karbon monoksida (CO) dengan rata-rata 13,62%, hidrogen (H₂) dengan rata-rata 8,65%, dan metana (CH₄) dengan rata-rata 2,55%. Adapun gas non-mampu bakar terdiri dari karbon dioksida (CO₂) dengan rata-rata 13,28% dan oksigen (O₂) dengan rata-rata 1,64%. Total konsentrasi gas mampu bakar (CO + H₂ + CH₄) rata-rata mencapai 24,82%, yang menunjukkan bahwa pelet bambu betung cukup potensial sebagai bahan baku gasifikasi udara.
2. Nilai *Lower Heating Value* (LHV) *syngas* hasil gasifikasi pelet bambu betung berada pada kisaran 819,18 hingga 981,45 kkal/m³ dengan rata-rata 887,57 kkal/m³. Nilai LHV tertinggi dicapai pada fase akhir proses gasifikasi (menit ke-47), yaitu sebesar 981,45 kkal/m³, yang bersamaan dengan meningkatnya konsentrasi H₂ dan menurunnya konsentrasi O₂ dalam *syngas*. Nilai LHV yang dihasilkan ini menunjukkan kecenderungan meningkat seiring berjalannya proses gasifikasi.
3. Analisis proksimat menunjukkan transformasi material yang signifikan selama proses gasifikasi. Pelet bambu betung memiliki kadar air 7,10%, abu 12,02%, zat terbang 74,11%, dan karbon terikat 6,78%, yang mengindikasikan kelayakannya sebagai bahan baku *gasifier* dengan kadar air di bawah batas 20% dan VM tinggi yang mendukung reaktivitas pirolisis. Setelah gasifikasi, *ash* menunjukkan peningkatan drastis kadar abu menjadi 73,09%, penurunan VM menjadi 17,61%, kadar air menjadi 4,67%, dan FC

menjadi 4,63%, yang menunjukkan konversi sukses fraksi organik menjadi *syngas*.

5.2. Saran

Pengembangan standardisasi kualitas pelet bambu betung sebagai *feedstock gasifier* perlu dilakukan untuk memastikan konsistensi kinerja sistem gasifikasi. Parameter standar yang perlu ditetapkan meliputi kadar air, densitas, ukuran partikel, nilai kalor, dan komposisi proksimat. Standardisasi ini akan memfasilitasi perdagangan pelet bambu betung sebagai komoditas energi dan memastikan kualitas *syngas* yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, H., Rahayu, P., Ulianas, A., Agustian, E., Sulaswatty, A. 2023. Pengaruh temperatur pirolisis terhadap karakteristik biochar dari limbah padat agroindustri teh. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*. 2(6): 1173–1183.
- Alfiandari, Y., Manfarizah, M., Darusman, D. 2023. Analisis karakteristik *biochar* bambu petung (*Dendrocalamus asper*) dan kayu pulai (*Alstonia scholaris* (L.) R. Br). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. 8(4): 817-826.
- Ali, G., Aly, H., Little, T. 2024. Automatic generation control of a multi-area hybrid renewable energy system using a proposed novel GA-fuzzy logic self-tuning PID controller. *Energies*. 17(9): 2000.
- Al-Insyrah, E. R., Febriana, I., Fadhlurrahman, M. R., Bow, Y. 2025. Analisis kinerja *gasifier downdraft* bahan baku tempurung kelapa dan pelet sekam padi ditinjau dari komposisi *syngas* dan nilai kalor. *Jurnal Penelitian Sains*. 27(1): 1-7.
- Alpian, A., Supriyati, W., Luhan, G., Surasana, I. N. 2023. Karakteristik pelet kayu laban (*Vitex pubescens*) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 41(1): 27-34.
- Amrullah, S., Oktaviananda, C. 2022. Effect of air fuel ratio to quality of municipal solid waste using *downdraft* gasification. *REM (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*. 7(1): 27-34.
- Andrianto, M. E., Marlina, E., Robbi, N. 2023. Karakteristik pembakaran *wood pellet* serbuk jati dan bambu betung dengan metode *single wood pellet*. *Jurnal Teknik Mesin*. 19(1): 58-62.
- Ansyor, Z. H., Mukmin, R., Antameng, B. P., Djamalu, Y., Fauziah, S., Cahya, E. S. 2025. Pengaruh sudut bukaan *vane blower* terhadap hasil gas sintesis dalam proses gasifikasi *downdraft*. *Journal of Energy and Mechanical Engineering*. 2(2): 27-31.

- Aristri, M. A., Hidayat, W., Iswanto, A. H., Lubis, M. a. R. 2024. Ramie Fibers from Agroforestry System as Sustainable Materials for Functional Textiles: A Review. *Jurnal Sylva Lestari*. 12(3): 962–979.
- 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.
- Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., Yuliarningsih, R., Magister, P. S., Lingkungan, T. 2023. Evaluasi pengaruh suhu dan waktu pirolisis *biochar* bambu betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1): 4760-4771.
- Barakat, N. A., Gamal, S., Kim, H. Y., Abd El-Salam, N. M., Fouad, H., Fadali, O. A., Abdelraheem, O. H. 2023. Synergistic advancements in sewage-driven microbial fuel cells: novel carbon nanotube cathodes and biomass-derived anodes for efficient renewable energy generation and wastewater treatment. *Frontiers in Chemistry*. 11: 1286572.
- Basu, P. 2024. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Edisi ke-4. Academic Press, Boston.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., Bhattacharya, S. 2021. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*. 162: 733-741.
- Cahyono, M. S., Aridito, M. N., Irvan, I., Syamsiro, M., Setiawan, H. S. H. 2023. Proses konversi metana menjadi hidrogen dengan proses pirolisis dalam reaktor kolom gelembung menggunakan logam cair. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*. 7(1): 53-58.
- Chen, J., Fan, Y., Zhao, X., Jiaqiang, E., Xu, W., Zhang, F., Leng, E., Liao, G., Liu, S. 2023. Syngas production from biomass gasification: influences of feedstock properties, reactor type, and reaction parameters. *ACS Omega*. 8(25): 22407-22424.
- Dewi, S. M. 2020. *Perkuatan Tulangan Bambu Menggunakan Klem-Selang (Hose Clamp)*: Monograf. Pustaka Abadi.
- Fadhilla, P. N., Nazarudin, S. 2023. Peranan gasifikasi batubara menjadi dimetil eter (dme) dalam bauran energi baru dan kontribusinya pada penurunan emisi gas rumah kaca di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 4(2): 83-96.
- Fadilah, P., Manfarizah, M., Darusman, D. 2021. Pengaruh ukuran partikel *Biochar* bambu terhadap sifat fisika tanah, kadar hara n, p, k dan produksi tanaman kedelai (*Glycine max L.*) selama dua musim tanam (jagung-kedelai). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. 6(3): 294-302.

- Febrian, A., Safei, R., Darmawan, A., Asmarahman, C., Hidayat, W. 2025. Analisis geospasial lahan agroforestri untuk budidaya lebah kelulut (*Trigona sp.*) di desa Karang Jaya, Kecamatan Merbau Mataram, Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Ilmiah Kehutanan Rimba Kalimantan/ULIN : Jurnal Hutan Tropis*. 9(2): 401.
- 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.
- Gronwald, F., Wang, L. 2024. Advancing renewable energy: the prospects of Hydrothermal Liquefaction (HTL) for biomass into bio-oil conversion. *International Journal of Environment, Engineering and Education*. 6(3): 132-144.
- Hani, A., Suryanto, P., Murniati, M. 2024. Growth of betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) and food crop production under agroforestry bamboo systems. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 30 (1): 155-155.
- Haqiqi, A. Z. 2023. Penggunaan Biomassa sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Wilayah Pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation*. 1(1): 42-51.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., Yoo, J. 2021a. Valorization of Indonesian Wood Wastes through Pyrolysis: A Review. *Energies*. 14(5): 1407.
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021b. Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 8(1) : 33-42.
- Haryanto, A., Megasepta, R., Febryan, K. W., Asmara, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Triyono, S. 2022. Use of corncob biochar and urea for pakchoi (*Brassica rapa L.*) cultivation: Short-term impact of pyrolysis temperature and fertiliser dose on plant growth and yield. *Kobra (Universitätsbibliothek Kassel)*.
- Haryanto, A., Pratama, Y. A., Triyono, S., Suharyatun, S. 2023. Karakteristik pellet dari bagas tebu. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*. 2(1): 130-143.
- Hasan, K., Swastika, A. B., Seidman, J., Wu, W. 2025. *Biomass co-firing in Indonesia: Prolonging, not solving coal problem.*

- Heny Dewajani, S. T. 2024. *Pemanfaatan Biomassa Ampas Tebu dengan Pirolisis dan Gasifikasi*. Deepublish.
- Hidayat, W., Haryanto, A., Ibrahim, G. A., Hasanudin, U., Prayoga, S., Saputra, B., Rahman, A. F., Tambunan, K. G. A. 2022. Pemanfaatan limbah biomassa jagung untuk produksi *biochar* di Desa Bangunsari, Pesawaran. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (JPKM) TABIKPUN*. 3(1): 45–52.
- Hidayat, W., Riniarti, M., Diantari, R., Talaumbanua, M., Suri, I. F., Utami, M. P., Saputra, B., Alfaridzi, M. 2023. Teknologi *single drum kiln* untuk produksi *biochar* limbah tongkol jagung di Desa Bangun Sari, Pesawaran. *Jurnal Kreativitas Pengabdian Kepada Masyarakat (PKM)*. 6(10): 4112–4124.
- Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yoo, J., Kim, S., Lee, S. 2021. Characteristics of biochar produced from the harvesting wastes of meranti (*Shorea sp.*) and oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 749(1): 012040.
- Hidayat, W., Utami, M. P., Nugraha, M. D., Duryat, D., Febryano, I. G., Herwanti, S., Suri, I. F. 2025. Pemanfaatan Limbah Tongkol Jagung: Produksi dan Pengembangan Usaha Biochar Desa Bangun Sari. *Yumary Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 6(1): 237–248.
- 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.
- Hutasuhut, S. H., Nugraha, Y. T., Mawardi, M., Novalianda, S., Setiawan, A. M., Arif, A., Sembiring, R. 2024. Analisis potensi sampah di Provinsi Sumatera Utara menjadi sumber energi listrik alternatif (Biogas). *Journal of Telecommunication and Electrical Scientific*. 1(02): 47-52.
- International Energy Agency. 2023. *CO2 Emissions in 2022*. IEA, Paris.
- Imran, M., Kumar, R., Qayyum, M. A., Saeed, M. 2021. Thermo-chemical processing of waste biomass for bioenergy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 149: 111273.
- Irawan, I., Mardiyana, I. I., Budiarto, H., Umam, F. 2022. *Gasifikasi: Teori dan Perancangan*. Media Nusa Creative (MNC Publishing).
- Irundu, D., Rahmania, H. M., Wahyudi, W., Ritabulan, R., Alviani, M. 2024. model alometrik penduga *aboveground biomass gigantochloa atter* di

- Desa Alu, Kabupaten Polewali Mandar. *Gorontalo Journal of Forestry Research*. 7(1): 01-12.
- Jahiding, M. 2024. Dekomposisi limbah organik tempurung kelapa menjadi *bio-coke hybrid* menggunakan metode pirolisis-lsm (*liquid solid mixing*). *Journal of Enviromental Science Sustainable*. 5(1): 13-17.
- Jannah, R., Soekendarsi, E., Taha, M., Salam, M. A. 2025. Karakteristik briket arang bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai bahan pembenah tanah. *Jurnal Biologi Tropis*. 25(4b): 341–347.
- Kakati, U., Nath, A., Biswas, A., Debnath, P. 2022. Gasification study of bamboo in downdraft gasifier under air-steam conditions. *Renewable Energy*. 188: 442-453.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2023. *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Kementerian ESDM, Jakarta. Indonesia.
- Kumar, A., Srivastava, R., Singh, V. 2022. Biomass gasification: A comprehensive review on various gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167: 112765.
- Lestari, V. A., Priambodo, T. B. 2020. Kajian komposisi lignin dan selulosa dari limbah kayu sisa dekortikasi rami dan cangkang kulit kopi untuk proses gasifikasi *downdraft*. *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*. 16(1): 1-8.
- Liang, Y., Cheng, B., Si, Y., Cao, D., Jiang, H., Han, G., Liu, X. 2023. Thermal conversion of gray-leafed bamboo (*Bambusa multiplex*) and energy products: Gasification kinetics, thermodynamics, and product characterization. *GCB Bioenergy*. 15(7): 854-869.
- Maulana, M. I., Murda, R. A., Purusatama, B. D., Sari, R. K., Nawawi, D. S., Nikmatin, S., Kim, N. 2021. Effect of alkali-washing at different concentration on the chemical compositions of the steam treated bamboo strands. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 49(1): 14-22.
- Minsas, S., Gusdiar, H., Idiawati, N. 2023. Laju pertumbuhan *kappaphycus alvarezii* metode keramba bambu apung kurungan di Melanau Barat Pulau Lemukutan. *Jurnal Akuatiklestari*. 6(2): 159-167.
- Morgano, M.T., Leibold, H., Richter, F., Stapf, D., Seifert, H. 2024. Proximate analysis in biomass: standards, applications and key characteristics. *Biomass and Bioenergy*. 190: 107422.
- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Lee, S., Kim, S., Kim, S., Chun, D., Choi, H., Im, H., Lim, J., Kim, K., Jun, D., Moon, J., Yoo, J. 2023. Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading

- and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 176: 113193.
- Nadeak, N., Qurniati, R., Hidayat, W. 2014. Analisis finansial pola tanam agroforestri di Desa Pesawaran Indah Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Jurnal Sylva Lestari*. 1(1): 65–74.
- Narega, S. O., Apriansyah Ysf, R., Aswan, A., Fatria, F., Erlinawati, E., Hilwatullisan, H. 2022. Produksi *syngas* dari proses gasifikasi biomassa menggunakan *downdraft gasifier* sebagai gas bakar pada motor bakar empat tak. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*. 2(11): 469–474.
- Nugraha, A., Irawansyah, H., Afifuddin, M. N., Al'Arisko, R. N. 2024. Analisis kualitas dan nilai ekonomis pellet kayu gelam. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*. 9(2): 264-271.
- Nurfauzi, A., Aryanto, D., Saputra, T. 2020. Karakteristik *syngas* dari gasifikasi biomassa menggunakan reaktor *downdraft*. *Jurnal Teknik Mesin*. 6(1): 32-39.
- Okoroigwe, E., Saffron, C. 2021. Biomass gasification: A review of technological barriers and socio-environmental impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 148: 111253.
- Praevia, M. F., Widayat, W. 2022. Analisis pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai *cofiring* pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 3(1): 28-37.
- Pranoto, B., Hermawan, D., Santoso, A. 2022. Potensi biomassa tanaman cepat tumbuh sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 18(1): 45-53.
- Pratiwi, I., Miarti, A., Setiorini, I. A., Kurniasari, D., Kusniawati, E. 2024. *Teknik Bioenergi*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Putri, R. W., Jannah, A. M., Muin, R., Rahmatullah, R. 2021. Proses katalitik gasifikasi kulit durian (*Durio zibethinus*) untuk produksi *synthetic natural gas* (SNG). *Jurnal Teknik Kimia*. 27(1): 1-6.
- Putri, R. W., Santoso, B., Habsyari, M. A., Aliyah, S. T., Al Hadi, A., Gobel, A. P. 2023. Pemanfaatan sekam padi untuk produksi biobriket dengan variasi binder tepung tapioka dan tepung biji durian. *Jurnal Teknik Kimia*. 29(1): 1-8.
- Putrika, A. 2023. *Jenisjenis Tumbuhan yang Berpotensi Sebagai Sumber Bahan Bakar Alternatif Masa Depan. Biologi Terapan untuk Masa Depan dan Kemajuan Bangsa*. 237.

- Raihansyah, A. 2025. Analisis komposisi syngas dan nilai kalor pada gasifikasi *updraft* dengan variasi laju alir udara. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*. 5(6): 1209–1221.
- Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(1): 63-70.
- Riniarti, M., Hidayat, W., Duryat, D., Priyambodo, P., Pra-Setia, H., Aliyah, S. H., Rahmawati, W. 2024. Quantifying the impact of biochar to enhance environmental quality through a bibliometric review. *Advances in Health Sciences Research/Advances in Health Sciences Research*. 47–60.
- Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., & Wijaya, B. A. 2025. The influence of pyrolysis temperature and dosage of shorea wood biochar produced on soil properties and sengon (*Falcataria moluccana*) seedling biomass. *E-Journal Menara Perkebunan*. 93(1): 57-67
- Rionaldo, H. 2021. Perancangan dan pembuatan program simulasi kesetimbangan termodinamika untuk proses gasifikasi biomassa. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*. 20(1): 94-103.
- Ritonga, M. A., Navia, Z. I., Arico, Z., Damayanto, I. P. G. P. 2020. Keragaman jenis bambu di kawasan ekosistem Leuser, Kecamatan Tenggulun, Kabupaten Aceh Tamiang, Aceh. *Buletin Plasma Nutfah*. 26(2): 109-122.
- Rulianah, S., Vilia, N., Mulyati, S., Handayani, F. 2024. Pembuatan biobriket dari kayu jati dan bambu petung dengan menggunakan metode pirolisis. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*. 10(1): 79–92.
- Sakhiya, A.K., Anand, A., Kaushal, P. 2024. Review of bamboo biomass as a sustainable energy. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 19: 1-15.
- Santana, H. E., Jesus, M., Santos, J., Rodrigues, A. C., Pires, P., Ruzene, D. S., Silva, D. P. 2025. Lignocellulosic biomass gasification: perspectives, challenges, and methods for tar elimination. *Sustainability*. 17(5): 1888.
- Santoso, A., Widodo, T., Supriadi, S. (2020). Pemanfaatan biomassa lignoselulosa untuk pembangkit listrik tenaga biomassa. *Jurnal Teknik Energi*. 12(2): 78-86.
- Saputra, M. H. 2020. Analisis teknis dan ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga biomassa (PLTBm) Menggunakan sabut kelapa hibrida. *j. Ekon*, 18, 41-49.

- Saputra, M., Amin, J. M., Junaidi, R. 2024. Konversi gas CO₂ menjadi gas metana (CH₄) menggunakan katalis Ni/Al₂O₃. *Innovative: Journal Of Social Science Research*. 4(5): 752-764.
- Saputro, M. A., Syamsiro, M., Megaprastio, B., Laksana, F. F. 2023. Kajian teknologi gasifikasi biomassa/sampah untuk produksi syngas dan listrik berkelanjutan. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*. 11(2): 122-129.
- Satriono, A., Siregar, I. 2021. Pengaruh variasi *Air Fuel Ratio* (AFR) pada *gasifier* tipe *downdraft* terhadap kadar syngas dan nyala api pada gasifikasi biomassa tempurung kelapa. *Jurnal Teknik Mesin*. 9(01): 57-64.
- Selpiana, S., Ningsih, R. Y. B., Putri, R. W., Syauqi, M. D. U., Hidayatullah, N. 2021. Sintesis bahan bakar padat berbahan baku residu (*char*) hasil pirolisis limbah plastik. *Indonesian Journal of Industrial Research*. 32(1): 75-84.
- Senjaya, N., Wijayanto, N., Wirnas, D., Achmad. 2024. Growth of betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) and food crop production under agroforestry bamboo systems. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 30(1): 1–12.
- Setiawan, A., Riskina, S. 2022. *Teknologi Konversi Biomassa Secara Termokimia: Pirolisis*. Syiah Kuala University Press.
- Setyawan, H. Y., Dewi, J. R., Ulandari, D., Pratiwi, D. A., Pratama, A. P. A. 2023. *Energi Biomassa*. Universitas Brawijaya Press.
- Setyawan, M. I. B., Dafiqurrohman, H., Akbar, M. H., Surjosatyo, A. 2021. Characterizing a two-stage downdraft biomass gasifier using a representative particle model. *Renewable Energy*. 173: 750-767.
- Siddik, M. 2023. Analisis rantai nilai dan nilai tambah komoditas bambu sebagai hbbk unggulan Pulau Lombok Nusa Tenggara Barat-Indonesia. *AGROTEKSOS*. 33(1): 64-78.
- Situmeang, I. Y. P. 2020. *Biochar Bambu Perbaiki Kualitas Tanah dan Hasil Jagung*. Scopindo Media Pustaka.
- Subhaktiyasa, P. G., Ayu, S., Rosita, N., Nafillah, K., Widyaningrum, N., Adi, W. M. 2025. Penerapan statistik deskriptif: perspektif kuantitatif dan kualitatif. *Emasains: Jurnal Edukasi Matematika dan Sains*. 14(1): 98–110.
- Sujarwanta, A., Zen, S. 2020. Identifikasi jenis dan potensi bambu (*bambusasp.*) Sebagai senyawa antimalaria. *BIOEDUKASI: Jurnal Pendidikan Biologi*. 11(2): 131-151.

- Suliono, F. D., Sudarmanta, B. 2020. Pengaruh kecepatan aliran udara dengan pengaturan dimmer pada tekanan udara masuk pada proses gasifikasi sekam padi terhadap pembentukan *flamable gas*. *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*. 6(1): 62-68.
- Suliono., Yuvenda, D., Yani, A. 2021. Simulasi pembakaran serbuk biomassa sekam padi pada proses gasifikasi berbasis *solar cell* dengan variasi jumlah *glowplug*. *Jurnal JAGO*. 1(2): 28-38.
- 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.
- Suri, I. F., Hidayat, W., Febryano, I. G. 2025. Thermal modification of bamboo: effects on physical, mechanical, and chemical properties. *Jurnal Belantara*. 8(2): 185-194.
- Susanto, H., Suharto, H., Ridho, M. 2021. Pengaruh ukuran partikel biomassa terhadap pembentukan tar pada proses gasifikasi. *Jurnal Teknik Kimia*. 26(4): 183-190.
- 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.
- Tumonglo, N. Y., Ridwan, R., Ainy, N. 2020. Pengawetan bambu dengan menggunakan larutan boraks boriks. *Jurnal Saintis*. 1(2): 25-30.
- Valente, C.A.L., de Andrade Lima, L.R.P., dos Santos Oliveira, I.J., Yamaji, F.M. 2021. Energy properties of bamboo biomass and mate co-products. *Discover Applied Sciences*. 3(5): 544.
- Wahyudi, I., Cahyono, T., Triyono, S. 2022. Optimasi parameter operasi gasifikasi biomassa untuk produksi *syngas*. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*. 6(1): 25-32.
- Waluyo, J., Amal, R. R. I., Yudistira, A. A., Mustofa, H., Maulana, M. L. 2022. Pengaruh *Fly Ash* sebagai Katalis pada Proses Pirolisis Pelet Sekam Padi terhadap Karakteristik Termal dan Produksi *Synthetic Gas* (*Syngas*). *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(2): 148-157.
- Wibowo, A. S., Septianti, S. D., Widodo, L. U. 2020. Pembuatan pupuk cair kalium silika berbahan baku abu daun bambu. *Chempro*. 1(1): 29-35.

- Wibowo, S. A., Windarta, J. 2020. Pemanfaatan batubara kalori rendah pada PLTU untuk menurunkan biaya bahan bakar produksi. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 1(3): 100-110.
- Wicaksono, D., Rizky, F. A., Khairunnisa, H., Pratiwi, V. M. R., Hermawan, W. G. 2023. Identifikasi persebaran bambu pada daerah aliran sungai pepe desa sawahan. *Nusantara Hasana Journal*. 2(8): 349-373.
- Widyastuti, A., Prasetyo, 2023. Pemanfaatan tanaman invasif sebagai sumber energi terbarukan: Studi kasus di Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Jurnal Konservasi Sumberdaya Hutan*. 5(1): 12-20.
- Wijaya, B. A., Hidayat, W., Riniarti, M., Saputra, B., Rani, I. T., Kim, S., Choi, H., Chun, D., Im, H., Kim, S., Lim, J., Yoo, J., Park, B. B. 2025a. Properties of Indonesian short rotation coppice (*Calliandra calothyrsus*) biochar as a coal substitute in the steelmaking process. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 15(14): 21187–21201.
- Wijaya, B. A., Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetia, H., Yoo, J., Park, B. B. 2025b. 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.
- Winarno, G. D., Harianto, S. P., Yuwono, S. B., Safe'i, R., Darmawan, A., Bakri, S., Wulandari, C., Dewi, B. S., Kaskoyo, H., Febryano, I. G., Asmarahman, C., Hilmento, R., Duryat, Hidayat, W., Salsabila, S. 2025. Peningkatan kualitas dan produk tanaman agroforestry berbasis masyarakat. *Repong Damar Jurnal Pengabdian Kehutanan Dan Lingkungan*. 4(2): 110–124.
- Wulandari, C. 2019. *Agroforestri: Pengelolaan Berbasis Ekosistem*. Plantaxia. Yogyakarta.
- Yazila, S., Faisal, M., Bahrin, D., Novia, N., Said, M. 2024. Production of CO Gas as Fuel Through The Utilization of CO₂ Greenhouse Gas and Fine Coal Solid Waste. *IJFAC (Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry)*. 9(2): 117-122.
- Zahro, F., Budiyanto, M., Ilhami, F. B. 2023. Potensi biomassa gasifikasi: alternatif berkelanjutan dalam menghasilkan energi listrik untuk masa depan. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*: 25(2): 103–115.
- Zhang, L., Wang, H., Wang, C. 2023. Ash characteristics and behavior during biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 172: 113012.