

**KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI LIMBAH KULIT
TANDUK KOPI (*COFFEE PARCHMENT*) MENGGUNAKAN
*DOWNDRAFT GASIFIER***

(Skripsi)

Oleh

**GUSTI WIJAYA
NPM 2214151042**



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

ABSTRAK

KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI LIMBAH KULIT TANDUK KOPI (*COFFEE PARCHMENT*) MENGGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER*

Oleh

GUSTI WIJAYA

Ketersediaan kopi yang berlimpah di berbagai sektor menyebabkan limbah hasil sisa pengolahannya kian meningkat juga. Salah satu sisa limbah kopi yakni kulit tanduk kopi. Kulit tanduk kopi atau coffee parchment merupakan bagian yang melapisi biji dan mempunyai kandungan karbon cukup banyak yaitu 45,3%. Jumlah karbon yang banyak inilah menjadi salah satu untuk menggunakan metode gasifikasi sebagai solusi pengurangan limbah kulit tanduk kopi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi gas sintesis (syngas), nilai lower heating value (LHV), serta karakteristik energi dari kulit tanduk kopi (coffee parchment) yang dihasilkan melalui proses gasifikasi menggunakan downdraft gasifier. Analisis syngas dilakukan menggunakan Portable Infrared Syngas Analyzer Gasboard G3100-P untuk menentukan kandungan CO, CO₂, CH₄, H₂, dan O₂. Hasil menunjukkan bahwa rata-rata komposisi syngas yang dihasilkan yaitu CO 4,95%, CO₂ 5,81%, CH₄ 0,56%, H₂ 4,24%, dan O₂ 13,19%. Nilai lower heating value rata-rata sebesar kcal/m³ dengan kisaran antara kcal/m³. Hasil analisis proksimat pada biomassa kulit tanduk kopi menunjukkan kadar air 14,85%, zat terbang 11,94%, abu 4,85%, dan karbon terikat 68,36%, sedangkan ash (by-product) memiliki kadar air 26,85%, zat terbang 8,63%, abu 6,81%, dan karbon terikat 57,71%. Hasil proksimat selain kadar air menunjukkan bahwa kulit tanduk kopi merupakan bahan baku yang bagus ketika dibakar, namun hasil syngas yang didominasi oleh oksigen (O₂) menyatakan adanya ketidakstabilan laju udara saat proses gasifikasi sehingga mempengaruhi komponen syngas lainnya.

Kata kunci : kulit tanduk kopi, biomassa agroforestri, gasifikasi, downdraft gasifier, syngas

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF SYNGAS PRODUCED FROM GASIFICATION OF COFFEE PARCHMENT WASTE USING DOWNDRAFT GASIFIER

By

GUSTI WIJAYA

Coffee-based agroforestry systems generate large quantities of processing residues, one of which is coffee parchment, the protective layer surrounding coffee beans during wet processing. Despite its relatively high carbon content, the utilization of coffee parchment as a renewable energy source remains limited. This study aimed to evaluate the potential of coffee parchment waste as a bioenergy feedstock through gasification by analyzing the syngas composition, lower heating value (LHV), and proximate characteristics of the biomass. Gasification experiments were conducted using a downdraft gasifier reactor with coffee parchment as the primary feedstock. Syngas composition was measured using a Portable Infrared Syngas Analyzer (Gasboard G3100-P) to determine the concentrations of CO, CO₂, CH₄, H₂, and O₂. In addition, proximate analysis was performed to evaluate moisture content, volatile matter, ash content, and fixed carbon of both biomass and gasification solid by-product in the form of biochar. The results showed that the average composition of the syngas composition consisted of 4.95% CO, 5.81% CO₂, 0.56% CH₄, 4.24% H₂, and 13.19% O₂. The lower heating value of the produced syngas ranged from 256.15 to 417.19 kcal/m³ during the gasification process. Proximate analysis revealed that coffee parchment biomass had an average moisture content of 14.85%, volatile matter of 11.94%, ash content of 4.85%, and fixed carbon of 68.36%. The relatively high fixed carbon content indicates that coffee parchment has promising characteristics as a solid bioenergy feedstock. However, the dominance of oxygen in the syngas composition suggests that airflow conditions in the gasifier were unstable, affecting the quality of the produced gas. Overall, the results demonstrate that coffee parchment waste from agroforestry systems has potential as a renewable energy resource, although

optimization of gasification operating conditions is required to improve syngas quality and energy efficiency.

Keyword: coffee parchment, agroforestry biomass, gasification, downdraft gasifier, syngas

**KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI LIMBAH KULIT
TANDUK KOPI (*COFFEE PARCHMENT*) MENGGUNAKAN
*DOWNDRAFT GASIFIER***

Oleh

GUSTI WIJAYA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



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

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : **KARAKTERISASI SYNGAS HASIL GASIFIKASI
KULIT TANDUK KOPI (*Coffee Parchment*)
MENGUNAKAN *DOWNDRAFT GASIFIER***

Nama : **Gusti Wijaya**

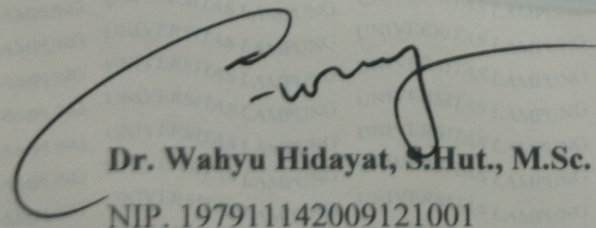
NPM : **2214151042**

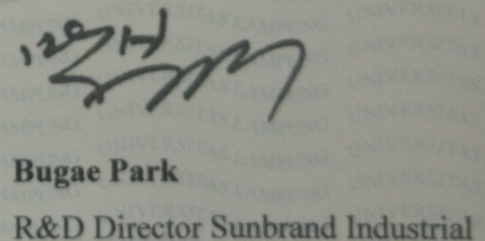
Jurusan : **Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**

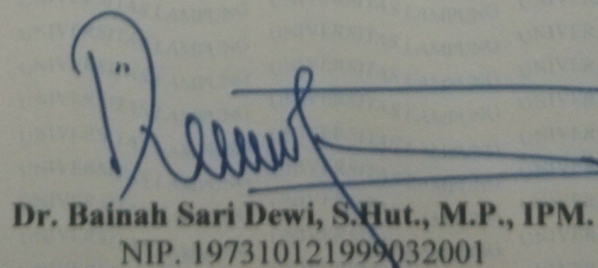
Tanggal Pengajuan : **19 Juni 2026**

MENYETUJUI
1. Komisi Pembimbing


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


Bugae Park
R&D Director Sunbrand Industrial

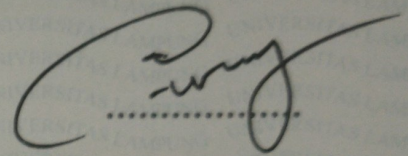
2. Ketua Jurusan Kehutanan


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

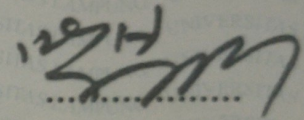
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

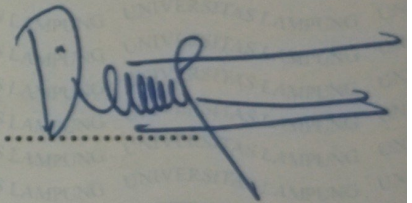
Ketua : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



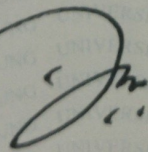
Sekretaris : Bugae Park



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



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

06411181989021002

Tanggal lulus ujian skripsi: 18 Mei 2026

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gusti Wijaya

NPM : 2214151111

Jurusan : Kehutanan

Alamat rumah : Desa Wiyono, Kec. Gedong Tataan, Kab. Pesawaran,
Lampung

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

“Karakterisasi Syngas Hasil Gasifikasi Kulit Tanduk Kopi (*Coffee Parchment*) 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



Gusti Wijaya
2214151042

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Gusti Wijaya, yang biasa dipanggil Gusti, lahir di Kecamatan Gedong Tataan pada 16 November 2003. Penulis adalah anak keempat dari empat bersaudara, anak pasangan dari Ayah dan Ibu. Penulis menempuh jenjang pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di TK Seni Budaya tahun 2010, Sekolah Dasar (SD) di SDN 2 Sumberrejo tahun 2011-2013 dan SDN 46 Gedong Tataan tahun 2013-2016, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Gadingrejo tahun 2016-2019, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Gadingrejo tahun 2019-2022. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti organisasi internal di kampus, yaitu Himpunan Mahasiswa Kehutanan (Himasylva) sebagai anggota. Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti penulis antara lain Tim Penelitian Ekspedisi Himasylva pada tahun 2024/2025 di Taman Nasional Way Kambas, serta kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Tajimalela, Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2025 selama 40 hari. Pada tahun yang sama di 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.

Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen mata kuliah Sifat dan Struktur Kayu (SSK) semester Genap (2025), Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (PDAS) semester Genap (2025), Bahasa Inggris semester Ganjil (2025), Pemetaan

dan Geomatika Kehutanan semester Ganjil (2025), dan Penggajian dan Pemesinan Kayu semester Genap (2026).

Penulis memiliki nilai 411 pada Surat Keterangan Pendamping Ijazah (SKPI) dengan kriteria unggul. Nilai tersebut diperoleh dari capaian pada beberapa komponen SKPI yang mencakup judul-judul kegiatan dan kompetensi yang telah diikuti, antara lain PKKMB Universitas Lampung Tahun 2022, *The Popular Activity of Scout In Another Country*, *Introduction to documenting plant genetic resources for food and agriculture*, *SDG Indicators 2.5.1 and 2.5.2 – Plant and Animal Genetic Resources*, *Climate-smart Forestry*, *Maintaining and restoring wetlands in agricultural settings*, *Introduction to forest management planning*, *Measurement, reporting and verification for environmental integrity: Introduction*, Optimalisasi Pengutan Ketahanan Pangan dan Energi di Kawasan Hutan: Mungkinkah?, Tumbuh Menjadi Eco Hero dari Gen Mienial dan Gen Z, Potensi Agroforestri sebagai Peluang Ekspor untuk Mewujudkan Stabilitas Perekonomian Indonesia, Jejak Ekspedisi Ilmiah: Meneguhkan Benteng Ekologis Terakhir di Tengah Tantangan Konservasi Lanskap di Pegunungan Sanggabuana, Peatihan Bahasa Inggris Ekstrakurikuler/Matrikulasi, Pembelajaran Modul Pencegahan dan Penanganan Kekerasan Seksual di Lingkungan Perguruan Tinggi, Gen Z dan Keberlanjutan: Mengapa Sertifikasi FSC Penting di Asia Pasifik?, *Promoting Green Technology for Better Environment and Current Utilization of Biomass in South Korea*, Sosialisasi Pendaftaran Magang dan Studi Independen Bersertifikat Kemendikbudristek, Perencanaan Hutan yang Tepat menuju Pengelolaan Kawasan Konservasi Berkelanjutan, Peluang dan Tantangan Pengelolaan Hutan Produksi menuju Lestari Ekonomi, Sosial, dan Ekonomi, Teknologi dan Aplikasi Perkat Kayu Ramah Lingkungan, Pengelolaan Hutan Berkelanjutan untuk Sertifikasi Karbon: Langkah Praktis dan Implementasi, Ekspedisi Studi Hutan Observasi dan Eksplorasi (SHOREA) Tahun 2024, dan Magang/Praktik Kerja Lapangan Mahasiswa di Taman Nasional Gunung Merbabu 5 Januari - 6 Februari 2024. Selain itu, sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan keilmuan, penulis telah mempublikasikan artikel ilmiah pada salah satu jurnal internasional (2026), yaitu *Global Forest Journal*, dengan judul “*Valorization of coffee parchment waste from*

agroforestry systems via downdraft gasification” dengan penulis Gusti Wijaya, Bugae Park, Bainah Sari Dewi, dan Wahyu Hidayat.

“Indeed, with hardship comes ease”
[94:5-6]

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Karakterisasi *Syngas* Hasil Gasifikasi Limbah Kulit Tanduk Kopi (*Coffee Parchment*) 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.
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. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku penguji pertama pada ujian skripsi. Terima kasih atas masukan dan saran-saran pada seluruh rangkaian proses sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Ibu Intan Fajar Suri, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan nasihat selama perkuliahan.

8. 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.
9. Ayahku Suwoto 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.
10. Ibuku Sularsih, 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.
11. Teman seperbimbingan yang sudah berjuang bersama dalam proses skripsi.
12. Teman-teman, sahabat, dan kerabat yang telah banyak memberikan semangat serta dukungan tanpa henti kepada penulis.
13. Keluarga besar angkatan 2022 (RERXTERION) dan keluarga besar Himasyva Universitas Lampung yang telah kebersamai serta membantu dalam perkuliahan.
14. 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

Gusti Wijaya

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian	4
1.4. Kerangka Pemikiran.....	4
1.5. Hipotesis.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Biomassa	6
2.2. Limbah Kulit Kopi	9
2.3. Gasifikasi.....	11
2.4. <i>Downdraft gasifier</i>	13
2.5. <i>Syngas</i>	15
2.6. Produk Samping (<i>by-product</i>) Gasifikasi.....	17
2.6.1. <i>Biochar</i>	17
2.6.2. Tar.....	19
III. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Waktu dan Tempat.....	21
3.2. Bahan dan Alat	21

3.3. Langkah Kerja	21
3.3.1. Persiapan Sampel	21
3.3.2. Proses Gasifikasi	22
3.4. Analisis Parameter.....	24
3.4.1. Analisis <i>Syngas</i>	24
3.4.2. Analisis <i>Lower heating value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	26
3.4.3. Analisis Proksimat.....	27
3.4.3.1. Kadar Air	27
3.4.3.2. Kadar Zat Terbang.....	28
3.4.3.3. Kadar Abu.....	28
3.4.3.1. Karbon Terikat.....	29
3.5. Analisis Data	29
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Analisa Komponen <i>Syngas</i>	30
4.1.1. Karbon Monoksida (CO).....	31
4.1.2. Karbon Dioksida (CO ₂).....	32
4.1.3. Metana (CH ₄)	33
4.1.4. Hidrogen (H ₂).....	34
4.1.5. Oksigen (O ₂).....	34
4.1.6. Analisa <i>Lower heating value</i> (LHV) <i>Syngas</i>	36
4.2. Analisis Proksimat Kulit Tanduk Kopi dan <i>Ash</i> (<i>by-product</i>) Gasifikasi	37
4.2.1. Kadar Air	37
4.2.2. Kadar Zat Menguap.....	39
4.2.3. Kadar Abu.....	39
4.2.4. Karbon Terikat.....	40
4.3. Penerapan <i>Syngas</i> Kulit Tanduk Kopi (Coffee Parchment) Sebagai Alternatif Energi Terbarukan).....	41
V. KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran.....	43

DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian.....	5
2. Berbagai tipe <i>gasifier</i> (a) <i>updraft gasifier</i> , (b) <i>downdraft gasifier</i> , (c) <i>crossdraft gasifier</i> (Basu, 2010).....	12
3. Alur gasifikasi pada <i>downdraft gasifier</i> (Marcic <i>et al.</i> , 2019).....	14
4. Kulit tanduk kopi (<i>coffee parchment</i>).....	22
5. <i>Feeder gasifier</i>	23
6. Generator listrik.....	23
7. Sakelar <i>gasifier</i>	23
8. Katup pembakaran manual.....	23
9. Tampilan panel dan tombol <i>gasifier</i>	24
10. Katup gas dan <i>gas analyzer conditioning</i>	24
11. <i>Outlet gas analyzer conditioning</i> dan <i>inlet</i> PISAG G3100-P.....	25
12. Tampilan panel PISAG G3100-P.....	25
13. Tampilan data <i>syngas</i> per waktu yang ditentukan.....	25
14. Tampilan <i>software gas analyzer v2.0.12</i>	26
15. Satuan LHV dalam mesin PISAG G3100-P.....	27
16. Grafik persentase kandungan CO.....	31
17. Grafik persentase kandungan CO ₂	32
18. Grafik persentase kandungan CH ₄	33
19. Grafik persentase kandungan H ₂	34
20. Grafik persentase kandungan O ₂	35
21. Grafik persentase <i>lower heating value</i> (LHV).....	36
22. Grafik perbandingan nilai kadar air.....	38
23. Grafik perbandingan nilai kadar zat terbang.....	39
24. Grafik perbandingan nilai kadar abu.....	40

25. Grafik perbandingan nilai karbon terikat	41
--	----

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Potensi Biomassa di Indonesia.....	6
2. Proporsi Pasokan Energi Primer Tahun 2009-2016	8
3. Wilayah Pengembangan Komoditas Kopi di Provinsi Lampung..... 10	
4. Komposisi <i>Syngas</i> pada 2 Tipe <i>Gasifier</i>	16
5. Persentase Nilai Komponen <i>Syngas</i> Kulit Tanduk Kopi.....	30
6. Nilai Kalor (LHV) Kulit Tanduk Kopi.....	36
7. Nilai Proksimat Biomassa Kulit Tanduk Kopi	37

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penyedia biomassa dalam sektor kehutanan di Indonesia ialah kawasan atau lahan yang menggunakan sistem agroforestri. Agroforestri berperan penting sebagai sumber biomassa melalui budidaya berbagai jenis tanaman dalam satu kesatuan lahan yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, termasuk energi dan bahan baku industri (Aristi *et al.*, 2025). Sistem ini mengintegrasikan tanaman kehutanan dengan komoditas pertanian atau peternakan, sehingga menciptakan ekosistem yang lebih beragam, produktif, dan berkelanjutan (Febrian *et al.*, 2025; Septian *et al.*, 2025; Winarno *et al.*, 2025). Salah satu model agroforestri yang sudah diterapkan dan berkembang adalah agroforestri berbasis kopi. Model agroforestri dapat memberikan layanan ekosistem yang hampir menyamai hutan dan pada saat yang sama dapat memenuhi aspek sosial, ekonomi, dan ekologi (konservasi) bagi masyarakat di sekitar kawasan hutan (Nadeak *et al.*, 2013; Supriadi dan Pranowo, 2015).

Dari total ekspor kopi Indonesia, sekitar 61% kopi yang diekspor berasal dari Provinsi Lampung (Amilin *et al.*, 2025). Menurut data Badan Pusat Statistik (2024), Provinsi Lampung menghasilkan sekitar 141.918 ton kopi robusta, meningkat 36.111 ton dibandingkan dengan tahun 2023.

Dalam proses produksi kopi, hanya bijinya yang dimanfaatkan, sementara kulit dan daging buahnya sering kali dibuang tanpa pemanfaatan yang optimal. Akibatnya, produksi kopi menghasilkan limbah dalam jumlah yang sangat besar (Achmad *et al.*, 2024). Limbah kulit kopi yang dihasilkan mencapai sekitar 50–60% dari total bobot kopi yang diproduksi (Wati *et al.*, 2024). Limbah kulit kopi merupakan limbah organik berlignoselulosa non-pangan yang terdiri dari 48% daging buah, 48% kulit kopi, dan 6% kulit biji (Nury *et al.*, 2023). Salah satu

bagiannya berupa kulit tanduk kopi atau *coffee parchment*, yaitu sebuah lapisan pelindung yang menutupi epidermis atau kulit air (*silverskin*) dan biji kopi, yang dapat ditemukan di bawah getah atau lendir (*mucilage*). Lapisan ini hanya dapat diperoleh melalui metode pengolahan basah atau *wet processing*. Di sisi lain, dalam metode pengolahan kering atau *dry processing*, kulit tanduk kopi (*parchment*) dihilangkan bersama komponen lainnya dan diperoleh sebagai kulit kopi (*coffee husk*) (Pongsiriyakul *et al.*, 2024).

Proses produksi kopi menghasilkan limbah berupa kulit tanduk dengan proporsi mencapai 28,7% dari total bobot kulit biji kopi (Winter *et al.*, 2025). Pemanfaatan limbah kulit tanduk kopi agar memiliki nilai tambah hingga kini belum dikembangkan secara optimal, karena umumnya limbah tersebut hanya dibiarkan di bawah tanaman sebagai bahan organik atau dibakar saat musim kemarau. Pengusaha penggilingan kopi sering menghadapi kendala dalam pengelolaan limbah ini. Salah satu cara paling mudah dan umum dilakukan adalah dengan membakar limbah kulit tanduk tersebut di area terbuka (Irwan *et al.*, 2023).

Limbah kulit tanduk kopi mengandung selulosa sebesar 63%, hemiselulosa 2,3%, dan lignin 17%, dengan kadar karbon total dalam senyawa organiknya mencapai 45,3% (Irwan *et al.*, 2023). Tingginya kandungan karbon dalam biomassa berkontribusi signifikan terhadap jumlah energi yang dapat dihasilkan selama proses konversi energi (Dinata *et al.*, 2022). Oleh karena itu, limbah kulit tanduk kopi memiliki potensi yang menjanjikan untuk dimanfaatkan sebagai substrat alternatif dalam produksi biogas. Proses konversi kulit kopi menjadi biogas dilakukan melalui metode gasifikasi, yaitu proses termal di mana biomassa dipanaskan dalam lingkungan dengan kadar oksigen rendah untuk mengubah bahan padat berkarbon menjadi gas sintetik yang dapat terbakar (Mujiarto *et al.*, 2023). Bahan baku yang digunakan dalam gasifikasi harus mengandung karbon, hidrogen, serta memiliki nilai kalor yang memadai (Gao *et al.*, 2023).

Melalui proses gasifikasi, hampir semua material organik padat dapat dikonversi menjadi gas bahan bakar yang lebih ramah lingkungan, salah satunya adalah *syngas*. *Syngas* atau gas sintetik, merupakan hasil dari gasifikasi yang terdiri dari karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄), yang dapat

dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif (Mujiarto *et al.*, 2023). Selain sebagai bahan bakar, *syngas* juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan berbagai senyawa kimia seperti metana, amonia, dan urea (Putta *et al.*, 2022). Pemanfaatannya mencakup produksi metanol, dimetil eter, dan amonia, sementara proses konversi lebih lanjut dari karbon monoksida dalam *syngas* dapat menghasilkan hidrogen ultrapure yang ideal untuk sel bahan bakar.

Pengembangan sistem gasifikasi biomassa yang dapat secara konsisten menghasilkan energi bersih dengan emisi karbon rendah menjadi langkah penting dalam menghadapi perubahan iklim serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya (Makwana *et al.*, 2023).

Karakterisasi *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi limbah kulit kopi (*coffee parchment*) menjadi langkah penting dalam menilai potensi penggunaannya. Penelitian ini dilakukan untuk menggali potensi limbah kulit kopi sebagai bahan baku dalam proses gasifikasi. Penelitian ini juga mengevaluasi kandungan senyawa di dalam *syngas* yang dihasilkan dari limbah kulit kopi, guna menilai kualitasnya sebagai upaya dalam mengoptimalkan pemanfaatan limbah biomassa menjadi sumber energi alternatif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi informasi yang bermanfaat dalam mendukung pemanfaatan limbah biomassa.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis komposisi gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan dari gasifikasi kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) menggunakan *downdraft gasifier*.
2. Menganalisis nilai *lower heating value* (LHV) *syngas* hasil gasifikasi kulit tanduk kopi (*coffee parchment*).
3. Menganalisis karakteristik energi kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) dan *ash* kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) yang dihasilkan sebagai produk samping dari proses gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier*.

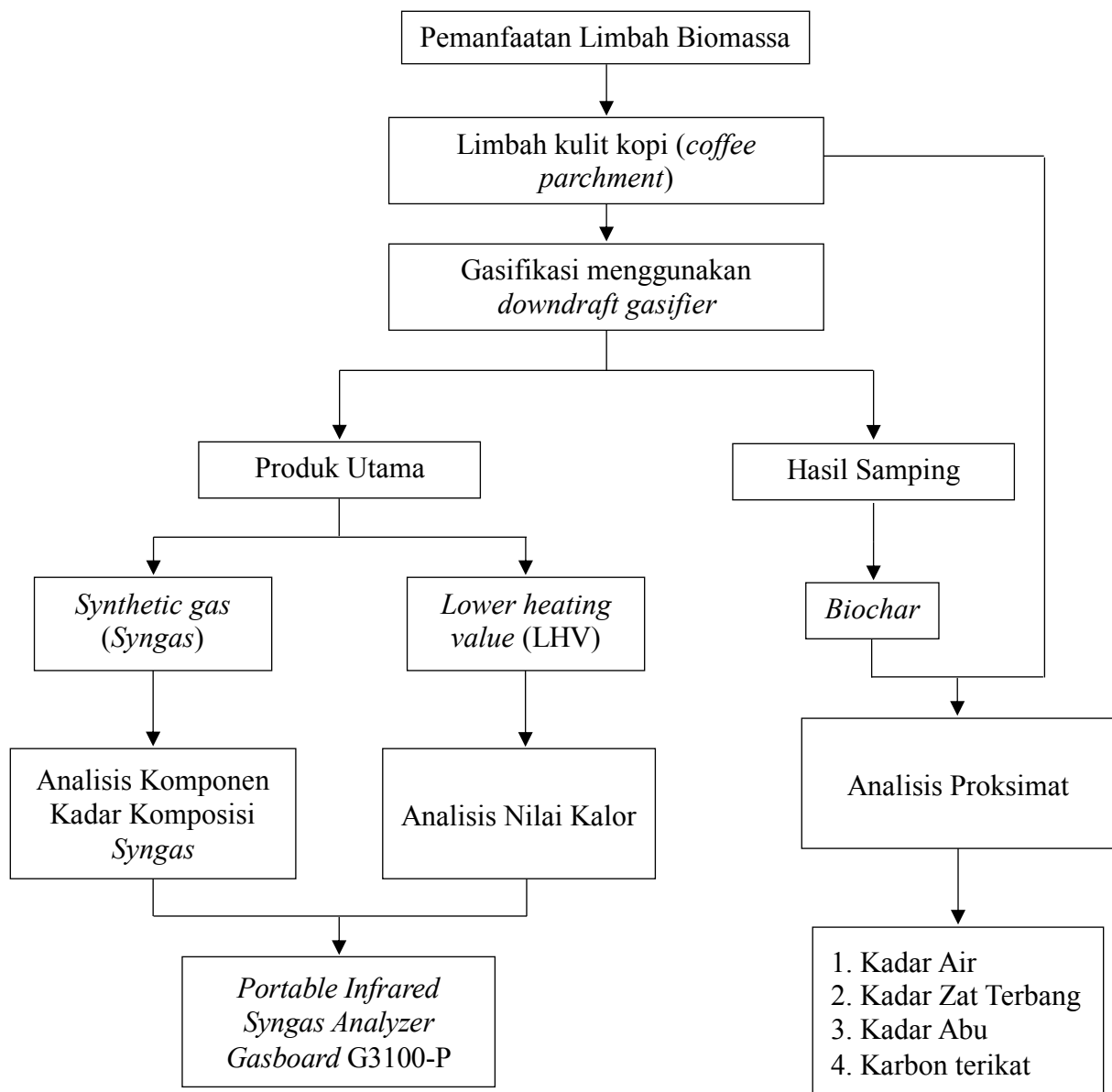
1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai karakteristik limbah kulit tanduk kopi dalam proses gasifikasi biomassa.
2. Menyediakan data mengenai nilai dari *syngas* limbah kulit tanduk kopi.
3. Memberikan data kuantitatif berdasarkan analisis kebutuhan bahan bakar, aliran gas dan udara, distribusi temperatur, serta sisa pembakaran yang dapat digunakan sebagai dasar dalam optimalisasi sistem gasifikasi.

1.4. Kerangka Pemikiran

Pemanfaatan limbah biomassa yang kian menumpuk terutama limbah kopi berupa kulit tanduk kopi atau *coffee parchment*. Salah satu strategi untuk mengurangi dengan mengolahnya menggunakan metode gasifikasi, metode ini dapat merubah limbah tersebut menjadi bahan baru yang dapat dimanfaatkan lebih jauh lagi. Produk utama hasil gasifikasi itu berupa *syngas* yang dianalisis kandungan senyawa kimia di dalamnya dan juga menganalisis besaran nilai kalor rendah atau *lower heating value* menggunakan gas *analyzer*. Model alat yang digunakan untuk menganalisis *syngas* ialah *portable infrared syngas analyzer gasboard* (PISAG) G3100-P. Adapun produk sampingan berupa tar dan *Biochar*. Dilakukan analisis proksimat berupa kadar air, zat terbang, kadar abu, dan karbon terikat pada *biochar* hasil gasifikasi kulit kopi dan juga biomassa kulit kopi. Hasil kedua bahan tersebut yang nantinya diperbandingkan untuk mengetahui kerangka pemikiran pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka pemikiran penelitian

1.5. Hipotesis

Hipotesis yang diajukan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Karakteristik limbah kulit kopi (*coffee parchment*) dapat dijadikan bahan baku gasifikasi.
2. Karakteristik *syngas* yang dihasilkan berupa CO, H₂, dan CH₄ memiliki nilai yang sesuai.
3. Gasifikasi limbah kulit kopi juga dapat menghasilkan *ash (by-product)* yang memiliki kualitas bagus.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa

Indonesia memiliki potensi biomassa yang melimpah dari berbagai sumber, antara lain limbah pertanian, residu kelapa sawit, limbah hutan, sampah perkotaan, biomassa akuatik, serta tanaman energi (Tabel 1). Total potensi biomassa yang tersedia diperkirakan mencapai ratusan juta ton per tahun (Setyawan *et al.*, 2020). Sejumlah sektor, seperti pertanian, perkebunan, dan kehutanan, telah memanfaatkan limbah biomassa sebagai sumber panas dalam proses manufaktur, dan sebagian juga digunakan untuk kebutuhan energi. Meskipun memiliki potensi yang sangat besar, pemanfaatan energi biomassa hutan di Indonesia masih tergolong rendah. Hutan memiliki kapasitas untuk menyediakan biomassa sebagai bahan baku dalam produksi biofuel generasi kedua (Kasmaniar *et al.*, 2023). Potensi biomassa di Indonesia disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Potensi Biomassa di Indonesia

Sumber Biomassa	Potensi	Perkiraan Ketersediaan (juta ton/tahun)
Limbah Pertanian	Tinggi	110
Biomassa Kelapa Sawit	Tinggi	45
Biomassa Kehutanan	Sedang	25
Limbah Padat Perkotaan	Tinggi	30
Biomassa Akuatik	Sedang	Bervariasi berdasarkan wilayah
Tanaman Energi	Tinggi	10

Sumber : Ardiansyah *et al.* (2024).

Biomassa merupakan istilah yang digunakan untuk merujuk berbagai komponen organik dari tumbuhan maupun hewan, baik yang tumbuh secara alami maupun yang dibudidayakan. Biomassa terbentuk melalui proses fotosintesis, yaitu mekanisme yang memungkinkan energi matahari disimpan dalam bentuk ikatan kimia (Radhiana, 2023). Secara umum, biomassa dapat diartikan sebagai bahan biologis yang bersumber dari makhluk hidup, atau dapat juga didefinisikan sebagai jumlah total organisme yang terdapat dalam suatu habitat tertentu. Biomassa dapat diperoleh dari bahan-bahan organik yang umumnya berumur relatif muda dan berasal dari tumbuhan atau hewan. Sebagai sumber daya yang dapat diperbarui, energi yang dihasilkan dari biomassa disebut sebagai energi terbarukan. Biomassa terdiri dari tiga matriks organik utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dihitung berdasarkan bobot keringnya (Nabila *et al.*, 2023; Nury *et al.*, 2023).

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki potensi sumber daya biomassa yang sangat melimpah, terutama dari sektor kehutanan dan pertanian (Haryanto *et al.*, 2021a; Wang *et al.*, 2022). Selain itu, berbagai sumber biomassa juga dapat diperoleh dari limbah padat perkotaan, limbah hewan dan pertanian, residu dari proses pengolahan makanan, tumbuhan air, serta alga (Tajali, 2015). Kegiatan pemanenan dan pengolahan kayu menghasilkan residu dalam jumlah yang signifikan (Haryanto *et al.*, 2021b; Hidayat *et al.*, 2021). Meskipun potensi biomassa sebagai bahan baku energi sangat besar tetapi pemanfaatannya hingga saat ini belum optimal, padahal biomassa dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif yang berkontribusi signifikan terhadap pasokan energi primer secara global (Nahak *et al.*, 2022). Persentase penggunaan jenis energi setiap tahun selama 7 tahun tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Proporsi Pasokan Energi Primer Tahun 2009-2016

Jenis Energi	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)	2016 (%)
Minyak	36,94	34,02	37,62	38,45	38,89	38,37	35,25	35,19
Batubara	18,24	20,59	22,22	22,35	19,82	20,61	23,47	23,43
Gas	19,37	19,7	17,41	16,81	17,69	17,48	18	17,97
PLTA	2,17	3,03	1,86	1,89	2,52	2,45	2,37	2,37
Geothermal	1,16	1,11	1,01	0,98	1	1,04	1,05	1,05
Biomassa	22,12	21,55	19,88	19,49	20,04	19,96	19,93	20,06
Biofuel	0	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08	0,04	0,04

Sumber : Primadanty *et al.* (2023).

Berdasarkan data dalam tabel di atas, energi biomassa termasuk salah satu sumber energi dengan proporsi pasokan terbesar kedua setelah minyak bumi. Pada tahun 2009, energi biomassa telah berkontribusi sebesar 22,12% dari total pasokan energi primer yang tersedia. Namun, hingga tahun 2012, porsinya sempat menurun menjadi 19,49%, sebelum kembali mengalami peningkatan secara fluktuatif hingga tahun 2016 dengan nilai sebesar 20,06%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa energi biomassa memiliki potensi yang signifikan sebagai sumber energi, meskipun pola pasokannya cenderung berfluktuasi dari waktu ke waktu.

Hu *et al.* (2021) menjelaskan bahwa biomassa dapat menghasilkan tiga jenis bahan, yaitu bahan cair, bahan padat, dan bahan gas. Terdapat pula empat kategori produk akhir dari pemanfaatan biomassa yakni bahan kimia, energi, listrik, dan bahan bakar. Indonesia sendiri memiliki potensi produksi energi biomassa yang sangat signifikan sekitar 146,7 juta ton per tahun atau setara dengan 470 GJ per tahun. Sebagian besar energi biomassa ini dapat diperoleh dari residu pertanian, perkebunan, peternakan, maupun limbah pemukiman. Meskipun demikian, pengembangan dan pemanfaatan biomassa di Indonesia masih menghadapi berbagai hambatan.

Parinduri *et al.* (2020) menyatakan bahwa sumber daya biomassa dapat digunakan secara berulang dan tidak terbatas, sesuai dengan siklus karbon yang berlangsung melalui proses fotosintesis. Biomassa juga berpotensi untuk diolah menjadi berbagai produk dengan nilai tambah yang dapat dimanfaatkan baik secara langsung maupun tidak langsung. Jenis produk yang dapat dihasilkan dari

biomassa sangat beragam, mulai dari bentuk cair, padat, hingga gas, seperti etanol, biodiesel, minyak nabati, biogas, substitusi gas alam, dan arang. Secara umum, produk akhir dari pemanfaatan biomassa dapat dikategorikan ke dalam tiga jenis, yaitu: (1) Bahan kimia yang dapat digunakan untuk kebutuhan transportasi, pangan, tekstil, dan berbagai keperluan lainnya; (2) Energi dan listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas maupun pembangkit listrik; serta (3) Bahan bakar transportasi yang dapat digunakan sebagai substitusi bahan bakar berbasis minyak bumi dan gas alam seperti biodiesel (Primadanty, 2023).

2.2. Limbah Kulit Kopi

Agribisnis kopi di Indonesia telah berkembang pesat dalam lima tahun terakhir, dengan 60% dari total produksinya diekspor dan Indonesia berkontribusi sebesar 7% terhadap produksi kopi dunia pada tahun 2017/2018 (ICO, 2019). Negara tujuan ekspor utama Indonesia adalah Uni Eropa dan Amerika Serikat, yang masing-masing menyerap 67% dari total impor kopi Indonesia (FAO, 2017). Kopi juga merupakan salah satu komoditas unggulan bagi petani di Provinsi Lampung dan daerah sekitarnya, termasuk Sumatera Selatan dan Bengkulu. Pada tahun 2019, tiga provinsi ini menyumbang 49% dari total produksi kopi nasional (BPS, 2020). Kopi jenis robusta merupakan tanaman perkebunan dengan produksi terbesar di Indonesia dan sebagian besar dihasilkan di Provinsi Lampung, dengan luas areal perkebunan sebesar 162.954 hektar dan total produksi 131.501 ton serta tingkat produktivitas rata-rata 965 kg per hektar (Noer dan Handayani, 2023). Kabupaten Lampung Barat tercatat sebagai daerah dengan area perkebunan kopi terluas di provinsi tersebut, yaitu sebesar 36,43% dari total luas lahan kopi di Lampung, dengan kontribusi produksi sebesar 43,54% dari total produksi kopi provinsi, serta jumlah produksi biji kopi kering per tahun mencapai 29.712 ton pada tahun 2019 (BPS, 2020). Data-data tersebut dapat dilihat lebih lengkap pada Tabel 3.

Tabel 3. Wilayah Pengembangan Komoditas Kopi di Provinsi Lampung

No.	Kabupaten/Kota	Luas lahan yang sudah digunakan (Ha)	Persen terhadap total (%)	Produksi (Ton)	Persen terhadap total (%)
1.	Lampung Timur	1.445	0,89	492	0,37
2.	Lampung Selatan	1.649	1,01	923	0,70
3.	Lampung Barat	59.357	36,43	57.254	43,54
4.	Lampung Utara	15.865	9,74	12.230	9,30
5.	Lampung Tengah	1.705	1,05	779	0,59
6.	Pesawaran	5.470	3,36	3.542	2,69
7.	Tulangbawang	663	0,41	182	0,14
8.	Bandarlampung	88	0,05	99	0,08
9.	Tanggamus	52.256	33,3	38.590	29,35
10.	Waykanan	22.456	13,78	17.410	13,24
Total		162.954	100	131.410	100

Sumber : Noer dan Handayani (2023).

Limbah kulit kopi sebagai salah satu bentuk biomassa telah menjadi fokus berbagai penelitian terkait pemanfaatannya di berbagai bidang. Kulit kopi diketahui mengandung beragam komponen, di antaranya selulosa (63%), lignin (17%), protein (11,5%), hemiselulosa (2,3%), tanin (1,8–8,56%), kafein (1,6%), serta berbagai komponen organik lainnya (Satrianda *et al.*, 2022). Karakteristik ini mendorong munculnya berbagai inovasi dalam pengolahan limbah perkebunan kopi, yang sebelumnya hanya dimanfaatkan sekitar 25% untuk pakan ternak, sedangkan 75% lainnya tidak termanfaatkan dengan optimal (Luthfianto *et al.*, 2020). Salah satu contoh pemanfaatannya dapat dilihat dari penelitian Debora dan Wicaksono (2020), yang menunjukkan bahwa pengomposan kulit kopi dapat memberikan efek signifikan dalam mendukung pertumbuhan bibit kopi Arabika, dengan tinggi tanaman rata-rata 28,7 cm dan jumlah daun sebanyak 12 helai ketika ditanam pada media tanam yang terdiri dari 100% kompos kulit kopi.

Selain itu, di bidang peternakan, terdapat perkembangan pemanfaatan lain dari limbah kulit kopi, yaitu sebagai substrat bagi pertumbuhan larva *Black Soldier Fly* (BSF), yang tidak hanya dapat digunakan sebagai pakan tetapi juga berkontribusi dalam pengurangan volume limbah perkebunan (Karyani, 2020). Luthfianto *et al.* (2020) juga mengungkapkan bahwa inovasi pemanfaatan kulit

kopi dapat dikombinasikan dengan sampah plastik untuk menghasilkan paving block dengan nilai kuat tekan sebesar 11,03 MPa, yang dicapai melalui proses pencampuran 30% limbah plastik dan 5% kulit kopi. Sementara itu, di sektor energi terbarukan, kulit kopi juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol dengan yield sebesar 65% melalui proses fermentasi selama 2 hari dengan bantuan *Saccharomyces cerevisiae* (Septiani *et al.*, 2020), meskipun penerapan teknologi ini dalam skala industri masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

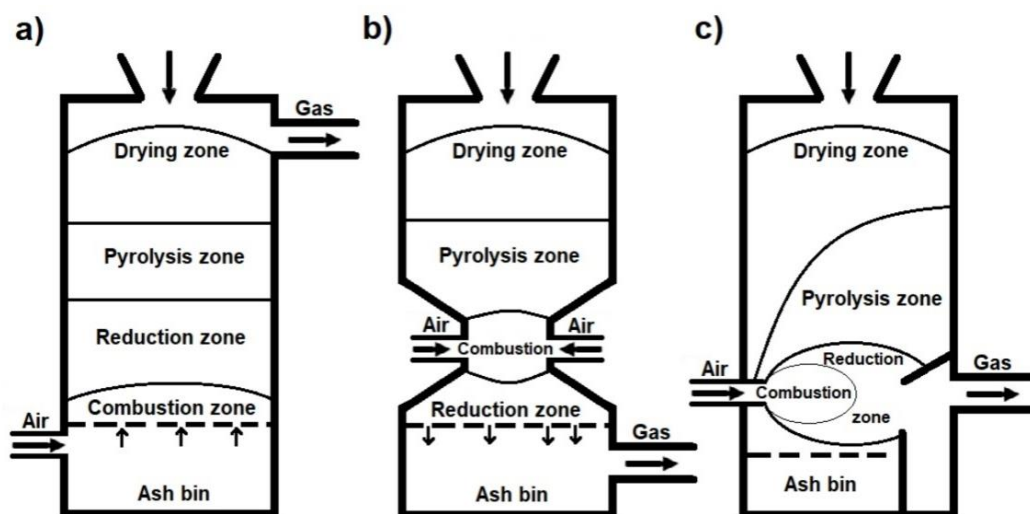
2.3. Gasifikasi

Gasifikasi merupakan metode konversi termokimia yang digunakan untuk mengubah bahan bakar padat menjadi gas sintetik (*syngas*) di dalam suatu *gasifier* dengan bantuan agen gasifikasi, seperti uap panas, udara, atau gas lainnya (Hutasoit *et al.*, 2025). Dalam proses gasifikasi, terdapat beberapa faktor yang memengaruhi kinerja proses, yaitu waktu, kecepatan aliran udara, serta rasio bahan bakar dan udara (*air fuel ratio* atau AFR) (Gao *et al.*, 2023). Amrullah *et al.* (2022) menyebutkan bahwa variasi nilai AFR berpengaruh signifikan terhadap kualitas gas yang dihasilkan, dimana peningkatan nilai AFR dapat meningkatkan kadar *syngas*. Sebaliknya, nilai konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption* atau SCF) cenderung menurun seiring dengan bertambahnya nilai AFR, yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai AFR, maka proses pembakaran berlangsung lebih efisien.

Menurut Mujiarto *et al.* (2023), proses gasifikasi terdiri atas empat tahapan utama, yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi, dimana masing-masing tahapan memunculkan reaksi kimia dan pelepasan senyawa yang berbeda. Tahap pertama adalah pengeringan, yaitu proses pengurangan kadar air dalam bahan baku (*feedstock*) tanpa menyebabkan dekomposisi unsur kimianya yang berlangsung seiring peningkatan suhu; semakin tinggi suhu meningkat, maka semakin cepat kadar air berkurang (Trejo, 2025). Tahap berikutnya adalah pirolisis, yakni dekomposisi termal terhadap bahan kering dalam lingkungan bebas oksigen yang menghasilkan gas-gas ringan seperti H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, serta arang dan tardengan rentang suhu 150°C hingga 800°C (Novita *et al.*, 2021).

Tahap ketiga yaitu oksidasi yang berlangsung pada suhu 600°C hingga 1.400°C , oksigen bereaksi dengan zat yang mudah terbakar untuk menghasilkan H_2O dan CO_2 , serta menyediakan energi panas bagi reaksi endotermik yang berlangsung di tahap selanjutnya (Rismawan, 2013). Tahapan terakhir adalah reduksi yang mencakup serangkaian reaksi endotermik pada suhu antara 600°C hingga 900°C dan menghasilkan gas-gas yang mudah terbakar seperti H_2 , CO , dan CH_4 (Siagian, 2016).

Efisiensi proses gasifikasi dipengaruhi oleh berbagai parameter yang sangat bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan serta tipe *gasifier* yang diterapkan. Salah satu parameter krusial yang turut menentukan kinerja gasifikasi adalah pemanasan awal udara gasifikasi. Pemanasan ini berperan dalam menurunkan kadar air (*moisture content*) pada bahan bakar, yang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan nilai kalor gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan. Semakin rendah kandungan kelembapan dalam bahan bakar padat, semakin tinggi pula nilai kalor *syngas* yang terbentuk. Namun demikian, pemanasan awal tersebut memerlukan pengaturan yang optimal karena jika dilakukan secara berlebihan dapat memicu pembentukan tar yang justru mengganggu proses gasifikasi secara keseluruhan (Mujiarto *et al.*, 2023). Terdapat tiga jenis *gasifier* yang diklasifikasikan berdasarkan arah aliran udara dalam sistem reaktor seperti pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Berbagai tipe *gasifier* (a) *updraft gasifier*, (b) *downdraft gasifier*, (c) *crossdraft gasifier* (Basu, 2010).

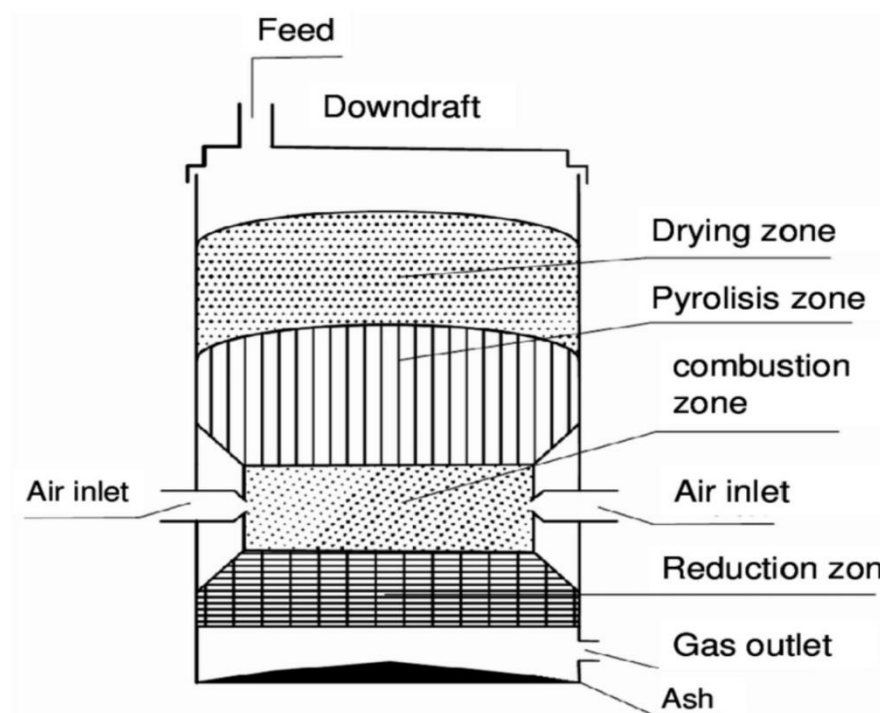
Tipe pertama adalah *updraft gasifier*, dengan aliran udara masuk melalui bagian bawah reaktor dan bahan bakar dimasukkan dari bagian atas. Gas hasil gasifikasi bergerak ke atas, melewati zona bahan bakar yang belum terbakar, lalu keluar melalui bagian atas reaktor (Hardiatama *et al.*, 2024). Pada *downdraft gasifier*, udara dialirkan dari bagian atas dan mengalir ke bawah melalui bahan bakar padat. Proses gasifikasi terjadi di bagian bawah reaktor pada suhu tinggi, menghasilkan gas sintetik (*syngas*) dengan kandungan tar rendah (Makoundiet *al.*, 2024). Sedangkan *crossdraft gasifier* menggunakan aliran udara horizontal dari sisi samping reaktor yang sejajar dengan lubang pengambilan gas, sehingga proses pembakaran terkonsentrasi pada satu titik dan berlangsung cepat dalam waktu tertentu (Yama *et al.*, 2022).

Ketiga tipe *gasifier* memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing. *Updraft gasifier* dikenal memiliki konstruksi yang sederhana dan mudah dioperasikan, namun memiliki kelemahan berupa tingginya kandungan tar dalam gas yang dihasilkan, karena tar terbawa oleh aliran gas dari zona reaksi bawah ke atas tanpa melalui proses dekomposisi secara menyeluruh (Vidian *et al.*, 2024). Sementara itu, *downdraft gasifier* mampu menghasilkan gas sintetik yang relatif bersih dengan kandungan tar lebih rendah, karena aliran gas melalui zona pembakaran terlebih dahulu, yang memungkinkan pemecahan tar secara lebih efektif (Trejo, 2025). Adapun *crossdraft gasifier* dirancang khusus untuk bahan bakar berupa arang dan beroperasi pada suhu oksidasi yang sangat tinggi ($> 1500^{\circ}\text{C}$), tetapi menghasilkan gas dengan kadar tar yang tetap tinggi serta memerlukan arang berkualitas tinggi untuk mencapai performa yang optimal (Bow *et al.*, 2022). Oleh karena itu, di antara ketiga tipe tersebut, *downdraft gasifier* dinilai paling optimal dalam menghasilkan gas sintetik (*syngas*) dengan kualitas yang baik.

2.4. *Downdraft gasifier*

Saleh *et al.* (2019) menyatakan bahwa teknologi gasifikasi merupakan metode konversi sampah organik menjadi gas sintetik (*syngas*) melalui proses termokimia dengan mengoksidasi sebagian limbah di dalam suatu reaktor yang disebut *gasifier*. Terdapat tiga tipe *gasifier* berdasarkan arah aliran udara. Tipe

pertama adalah *updraft*, yang menempatkan sumber panas di bagian bawah bahan bakar, dengan aliran udara bergerak ke arah atas. Selanjutnya, pada tipe *downdraft*, sumber panas juga berada di bagian bawah, namun aliran udara diarahkan langsung menuju zona gasifikasi di dasar reaktor. Tipe ketiga adalah *inverted downdraft* yang menempatkan zona pembakaran di bagian atas reaktor, sedangkan bahan bakar berada di bagian bawah (Latif, 2015). Masing-masing tipe memiliki karakteristik teknis tersendiri, dan desain *gasifier* yang optimal idealnya mampu menghasilkan tar dengan konsentrasi tidak melebihi 1 g/m³. Pada suhu rendah, khususnya di bawah 500°C, produksi tar cenderung meningkat pada awalnya, namun akan menurun seiring meningkatnya temperatur (Budiarto *et al.*, 2021). Salah satu jenis *gasifier* yang umum digunakan dalam proses gasifikasi adalah *downdraft gasifier* yang dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Alur gasifikasi pada *downdraft gasifier* (Marčić *et al.*, 2019).

Jenis reaktor ini banyak diaplikasikan dalam sistem pemanasan skala kecil serta pembangkitan daya karena, selain memiliki desain yang relatif sederhana, juga mampu menghasilkan gas sintetis (*syngas*) dengan kualitas yang lebih baik, khususnya dalam hal kandungan tar yang lebih rendah (Chan *et al.*, 2020). Proses gasifikasi dalam *downdraft gasifier* mencakup beberapa tahapan utama, yaitu

pengeringan (*drying*), pirolisis, oksidasi (*oxidation*), dan reduksi (*reduction*). Salah satu keunggulan tipe ini adalah kemampuannya digunakan dalam sistem gasifikasi yang terintegrasi dengan pengelolaan residu pembakaran (abu) secara efisien. Kandungan tar yang relatif rendah dalam *syngas* yang dihasilkan, berkisar antara 1–30 g/Nm³, menyebabkan sistem pemurnian gas menjadi lebih sederhana dan mampu menghasilkan *syngas* yang cukup bersih (Sher *et al.*, 2024).

2.5. *Syngas*

Salah satu sumber daya alam alternatif yang berpotensi menggantikan atau mensubstitusi penggunaan gas alam adalah gas sintetis (*syngas*). *Syngas* merupakan campuran gas yang secara dominan terdiri atas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂), serta dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun bahan baku dalam produksi senyawa kimia baru, seperti metana, amonia, dan urea. Komposisi gas ini sangat penting dalam berbagai aplikasi, termasuk mesin pembakaran internal, boiler, sel bahan bakar, serta produksi bahan bakar sintetis. Dalam proses gasifikasi, pertimbangan utama meliputi efisiensi yang tinggi, produksi debu yang minimal, serta kuantitas hasil samping yang lebih sedikit menjadikan semuanya aspek penting dalam peningkatan performa sistem (Hoque *et al.*, 2021).

El-Nagar dan Ghanem (2019) menyatakan bahwa gas sintetis (*syngas*) didefinisikan sebagai gas yang secara umum memiliki komponen utama berupa hidrogen (H₂) dan karbon monoksida (CO) sebagai bahan bakar utamanya. Kandungan tambahan dalam *syngas* dapat bervariasi tergantung pada berbagai faktor, seperti jenis dan asal bahan baku, ukuran partikel, laju aliran gas, konfigurasi reaktor kimia, kondisi operasional selama proses pembentukan, penggunaan katalis, dan parameter teknis lainnya. Selain itu, gas ini juga dapat mengandung senyawa lain seperti karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O). Persentase volume masing-masing komponen dalam *syngas* sangat dipengaruhi oleh tipe *gasifier* yang digunakan (Visconti *et al.*, 2017). Perbedaan komposisi antara kedua tipe *gasifier* dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Komposisi *Syngas* pada 2 Tipe *Gasifier*

Komposisi	<i>Gasifier</i> Tipe <i>Updraft</i> (% volume)	<i>Gasifier</i> Tipe <i>Downdraft</i> (% volume)
Karbon Monoksida	24	21
Hidrogen	11	17
Metana	3	2
Hidrokarbon	0,2	0,3
Nitrogen	53	48
Uap Air	3	4

Sumber : El-Nagar dan Ghanem (2019).

Volume udara yang masuk ke dalam karburator berperan penting dalam memengaruhi laju aliran massa *syngas* serta kualitas gas yang dihasilkan. Salah satu permasalahan utama dalam aliran *syngas* adalah kandungan tar, karena senyawa ini dapat mengalami kondensasi pada suhu sekitar 350°C dan berpotensi menyumbat saluran gas, katup, hingga ruang bakar mesin. Batas maksimum kandungan tar yang dapat ditoleransi dalam mesin pembakaran internal adalah sebesar 100 g/Nm³ (Skolou *et al.*, 2018). Efisiensi gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi didefinisikan sebagai perbandingan antara energi panas dari bahan bakar yang terbakar sempurna dengan energi panas yang terkandung dalam *syngas* hasil gasifikasi (Syarif *et al.*, 2020). Pengetahuan mengenai efisiensi gasifikasi, baik dalam bentuk gas panas maupun gas dingin, sangat penting untuk menyesuaikan pemanfaatan *syngas* dengan kebutuhan. Menurut Syarif *et al.* (2020), nilai kalor rendah atau *lower heating value* (LHV) merupakan salah satu parameter utama yang menunjukkan besarnya energi dalam *syngas* dan dipengaruhi oleh kandungan komponen mudah terbakar di dalamnya. Semakin tinggi kandungan komponen yang dapat terbakar, semakin besar nilai kalor atau LHV yang dihasilkan (Mujiarto *et al.*, 2023).

Syngas memiliki batas mudah bakar (*flammability limits*) yang menunjukkan sejauh mana nyala api dapat mempertahankan pembakaran gas. Batas ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis bahan bakar, arah penyebaran api, dimensi dan bentuk ruang bakar, serta suhu dan tekanan (Luo *et al.*, 2025). Komponen utama dalam *syngas* yaitu hidrogen (H₂) dan karbon

monoksida (CO), yang diketahui berkontribusi secara signifikan dalam memperluas batas mudah bakar sehingga keberadaan keduanya dalam jumlah yang melimpah merupakan indikator kualitas *syngas* yang baik. Sebaliknya, keberadaan senyawa inert seperti nitrogen (N₂) dan karbon dioksida (CO₂) dalam campuran *syngas* justru dapat mempersempit batas mudah bakarnya. Oleh karena itu, produksi *syngas* yang optimal sebaiknya meminimalkan kandungan N₂ dan CO₂ agar kinerja pembakarannya tetap efisien (El-Nagar dan Ghanem, 2019).

2.6. Produk Samping (*by-product*) Gasifikasi

Selain produk utama berupa *syngas*, proses gasifikasi ini juga menghasilkan produk samping berupa *biochar* (arang) dan tar (Alwan, 2019). Pembentukan produk samping tersebut sangat bergantung pada komposisi biomassa yang digunakan sebagai bahan baku dalam proses gasifikasi (Hu *et al.*, 2021). *Biochar* (arang) yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar domestik atau diolah lebih lanjut menjadi pupuk dan karbon aktif, serta memiliki berbagai aplikasi lainnya (Hidayat *et al.*, 2025; Prayoga *et al.*, 2025; Riniarti *et al.*, 2025; Wijaya *et al.*, 2025). Sebaliknya, tar merupakan produk samping yang tidak diinginkan dalam proses gasifikasi karena keberadaannya menurunkan kualitas *syngas* dan dapat menimbulkan berbagai permasalahan teknis, seperti korosi serta penyumbatan pada peralatan (Marulanda *et al.*, 2019).

2.6.1. *Biochar*

Biochar merupakan bahan padat yang terbentuk melalui proses karbonisasi biomassa selama dekomposisi termokimia (Novita *et al.*, 2021). Bahan ini juga dikenal sebagai arang yang dihasilkan dari pirolisis bahan organik yang mengalami karbonisasi pada suhu tinggi (Hidayat *et al.*, 2023; Nurkholifah *et al.*, 2020; Riniarti *et al.*, 2024). Secara umum, *biochar* diproduksi dari limbah atau residu yang berasal dari aktivitas kehutanan dan pertanian, seperti sisa penebangan, limbah pemanenan, kayu mati, maupun residu penggilingan kayu *pulp* (Hidayat *et al.*, 2021; Hidayat *et al.*, 2022; Riniarti *et al.*, 2021; Wijaya *et al.*, 2021; Wijaya *et al.*, 2022). Proses produksinya dilakukan melalui dekomposisi termal dengan suplai oksigen terbatas dan pada temperatur kurang dari 700°C.

Variasi suhu selama proses pirolisis tersebut sangat berpengaruh terhadap karakteristik akhir *biochar* yang dihasilkan (Hidayat *et al.*, 2017).

Biochar merupakan produk padat yang kaya akan karbon yang dihasilkan dari proses dekomposisi termal biomassa melalui pirolisis dalam kondisi tertutup atau dengan suplai udara terbatas pada rentang suhu antara 350°C hingga 700°C (Rutigliano *et al.*, 2014). Proses pirolisis ini menguraikan struktur karbohidrat dalam biomassa menjadi residu karbon padat berupa *biochar*, serta menghasilkan uap yang dapat berupa senyawa terkondensasi maupun tidak terkondensasi dengan berbagai massa molekul. *Biochar* termasuk produk bernilai tambah yang memiliki beragam aplikasi antara lain sebagai sumber energi, agen remediasi dan pemupukan tanah, pengurang emisi gas rumah kaca, media penyerapan karbon, serta adsorben polutan (Sanena *et al.*, 2024; Sher *et al.*, 2020; Riskilillah *et al.*, 2024; Wijaya *et al.*, 2025). Ketika diaplikasikan ke dalam tanah, *biochar* mampu menstabilkan pH, meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air, serta memperbaiki kapasitas tukar kation. Selain itu, *biochar* juga efektif dalam mempertahankan dan menyerap senyawa berbahaya (Hale *et al.*, 2013; Haryanto *et al.*, 2022; Maulani *et al.*, 2024; Rafly *et al.*, 2022; Yunita *et al.*, 2023).

Sifat fisik dan kimia *biochar* sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti karakteristik biomassa, jenis bahan baku, waktu tinggal dalam reaktor, laju reaksi, serta suhu pirolisis yang diterapkan (Dayoub *et al.*, 2024). Di antara faktor-faktor tersebut, suhu pirolisis memiliki pengaruh signifikan terhadap kemampuan *biochar* dalam menyerap polutan dari larutan air (Tomczyk *et al.*, 2020). Proses pirolisis merupakan reaksi termokimia yang dilakukan pada biomassa pada rentang suhu 300°C hingga 800°C, dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan suplai oksigen yang sangat terbatas. Selama proses ini, komponen kimia dalam biomassa mengalami reaksi ikatan silang, dekomposisi, dan depolimerisasi, yang kemudian menghasilkan residu karbon padat berupa *biochar*, serta produk lain berupa senyawa terkondensasi dan tidak terkondensasi, seperti air, minyak nabati, dan gas sintetik (Kumar dan Panwar, 2024).

Biochar berpotensi besar sebagai pembenah tanah alternatif untuk memperbaiki kualitas lahan yang telah mengalami degradasi, khususnya pada lahan sub-optimal. Penggunaannya terbukti efektif dalam menurunkan tingkat

keasaman tanah, terutama pada lahan kering masam yang umum dijumpai di wilayah Indonesia. Keasaman pada jenis lahan tersebut umumnya disebabkan oleh tingginya konsentrasi aluminium yang bersifat toksik bagi tanaman, sehingga menghambat pertumbuhan dan menurunkan produktivitas lahan. Selain itu, biochar juga memiliki kemampuan untuk mengurangi kehilangan unsur hara dan pencucian pestisida yang pada akhirnya dapat meningkatkan kualitas lingkungan secara keseluruhan (Septiana *et al.*, 2021).

2.6.2. Tar

Tar merupakan campuran senyawa yang sebagian besar bersifat aromatik, dengan massa molekul lebih tinggi daripada benzena (Luo *et al.*, 2025). Senyawa-senyawa tar ini membentuk partikel halus berukuran $< 1 \mu\text{m}$ menyerupai kabut, yang dapat mengalami aglomerasi menjadi tetesan berukuran lebih besar dan mengembun dalam rentang suhu yang luas, serta jauh di atas suhu lingkungan. Selain itu, tar juga memiliki sifat melekat pada partikel padat dan permukaan peralatan yang dapat menyebabkan pengotoran, korosi, serta penyumbatan pada saluran dan perangkat sistem gasifikasi (Luo *et al.*, 2025). Terlepas dari jumlah dan komposisi tar yang terbentuk, penanganan tar tetap menjadi tantangan umum dalam sistem gasifikasi (Luo *et al.*, 2025). Konsentrasi serta karakteristik kimia tar sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain: (1) temperatur operasi, (2) desain *gasifier* (seperti tipe *downdraft*, *updraft*, atau *fluidized bed*), (3) medium gasifikasi yang digunakan, (4) jenis bahan baku, (5) waktu tinggal dalam reaktor, dan (6) tekanan (Basu, 2010).

Tar biasanya terbentuk selama tahap pirolisis dan terkondensasi menjadi asap pada suhu antara 200°C hingga 600°C , meskipun dalam kondisi tertentu dapat muncul dalam bentuk cair pada suhu yang lebih rendah. Kandungan tar yang tinggi dalam *syngas* dapat menyebabkan kerusakan pada komponen mesin seperti karburator dan katup masuk (*intake valve*), yang pada akhirnya dapat menurunkan masa pakai *gasifier* (Kaupp, 2013). Oleh karena itu, desain *gasifier* yang optimal idealnya hanya menghasilkan tar dalam jumlah yang tidak melebihi 1 g/m^3 (Sher *et al.*, 2024). Limbah tar yang dihasilkan dari proses gasifikasi

menyumbang sekitar 10% hingga 15% dari total energi yang terkandung dalam seluruh produk gasifikasi (Zeng *et al.*, 2020).

Komponen kimia dalam tar hasil gasifikasi meliputi senyawa fenolik, senyawa aromatik, aldehida, keton, furan, dan asam organik (Siagian, 2016). Kandungan senyawa fenolik dalam tar diketahui meningkat seiring dengan kenaikan suhu pirolisis, yakni sebesar 6,72% pada suhu 400°C dan mencapai 8,99% pada suhu 600°C (Siagian, 2016). Tar juga mengandung fenol yang dapat menimbulkan polusi sekunder, serta senyawa aromatik seperti benzena yang bersifat karsinogenik, sehingga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan apabila dibuang tanpa pengolahan terlebih dahulu (Zeng *et al.*, 2020). Selain itu, sekitar 70% kandungan tar terdiri dari senyawa aromatik ringan seperti benzena dan toluena (Luo *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pengelolaan limbah tar secara tepat sangat penting untuk mencegah pencemaran lingkungan dan dampak toksikologis yang ditimbulkannya.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di mulai dari bulan April 2025-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. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa 30 kg kulit kopi (*coffee parchment*) yang didapat secara komersil dari petani kopi di Desa Talang Mulya, Padang Cermin, Pesawaran, Lampung. Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain reaktor *downdraft gasifier*, *flame gun*, *portable gas*,botol penyemprot, biosolar, air pump, ember plastik, *blower*, drum besi, timbangan analitik, selang silikon, *generator*, *crucible*, *muffle furnace*,oven, *gas analyzer conditioning*, dan *portable infrared syngas analyzer gasboard* (PISAG) G3100-P.

3.3. Langkah Kerja

3.3.1. Persiapan Sampel

Bagian kopi yang diambil hampir semuanya, hanya menyisakan bijinya saja, atau yang disebut *coffee husk*, yang terdiri dari kulit buah, daging buah, kulit ari, dan kulit tanduk. Bagian yang digunakan adalah kulit tanduk kopi (*coffee parchment*). *Coffee parchment* tersebut kemudian mengalami proses pencacahan menjadi bagian-bagian yang lebih kecil lagi oleh petani kopi dari Desa Talang

Mulya, Padang Cermin, Pesawaran, Lampung (Gambar 4). Sebelum dimasukkan ke dalam mesin, *coffee parchment* yang masih tergolong lembab dengan kadar air > 20% dijemur terlebih dahulu di bawah sinar matahari hingga kadar airnya berkurang menjadi < 20%. Setelah kadar air sesuai, bahan tersebut dapat digunakan dalam proses gasifikasi. Hal ini dilakukan agar tidak mengganggu proses gasifikasi yang dilakukan oleh *downdraft gasifier*. Menurut Chuchita *et al.* (2022), kadar air dalam biomassa memengaruhi nilai kalor. Semakin tinggi kadar air padatan bahan bakar, semakin besar nilai kalor yang dibutuhkan dalam proses pembakaran, sehingga diperlukan energi tambahan.



Gambar 4. Kulit tanduk kopi (*coffee parchment*).

3.3.2. Proses Gasifikasi

Gasifier tipe *downdraft* memiliki berbagai tahapan hingga dapat menghasilkan gas sintetik atau *syngas*. Proses gasifikasi melalui langkah-langkah pada Gambar 5 hingga Gambar 9.

- 1) Kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) yang sudah dijemur dimasukkan ke dalam *feedstock* yang disalurkan ke bagian bawah mesin oleh *feeder*.



Gambar 5. *Feeder gasifier.*

- 2) Generator kemudian dihidupkan untuk menyalurkan aliran listrik ke reaktor *downdraft gasifier.*



Gambar 6. Generator listrik.

- 3) Reaktor *downdraft gasifier* kemudian dihidupkan dengan menaikkan sakelar on/off di sebelah kiri.



Gambar 7. Sakelar *gasifier.*

- 4) Pembakaran manual dilakukan menggunakan *flame gun* pada kulit kopi.



Gambar 8. Katup pembakaran manual.

- 5) Setelah suhu mencapai 200°C, dilakukan otomatisasi pada mesin *gasifier* agar proses gasifikasi berjalan secara otomatis.



Gambar 9. Tampilan panel dan tombol *gasifier*.

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 gasifikasi, yaitu *syngas*. PISAG G3100-P juga dapat merekam data *syngas* yang dianalisis serta menyimpannya. Perekaman data dapat dilakukan dalam rentang waktu tertentu, dengan durasi minimal 1 detik. Data maksimal yang dapat disimpan adalah 2560. Proses analisis *syngas* tersebut melalui langkah-langkah pada Gambar 10 hingga Gambar 14.

- 1) Katup gas pada *gasifier* dibuka, kemudian selang silikon *gasifier* disambungkan ke selang silikon sebelah kiri pada *gas analyzer conditioning*.



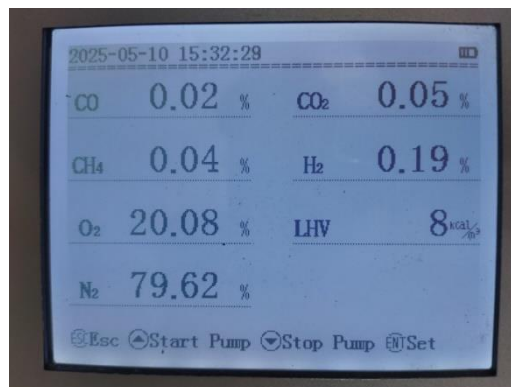
Gambar 10. Katup gas dan *gas analyzer conditioning*.

- 7) Selang silikon sebelah kanan *gas analyzer conditioning* kemudian disambungkan dengan selang silikon pada PISAG G3100-P.



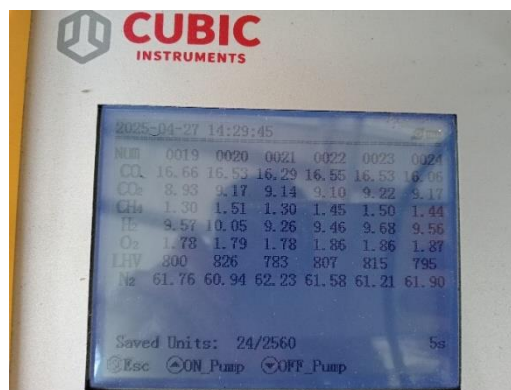
Gambar 11. Outlet gas analyzer conditioning dan inlet PISAG G3100-P.

- 8) Syngas yang terlasurkan nantinya akan teridentifikasi oleh PISAG G3100-P. Gas yang teridentifikasi antara lain CO, CO₂, CH₄, H₂, dan O₂, serta nilai kalor berupa *lower heating value* (LHV).



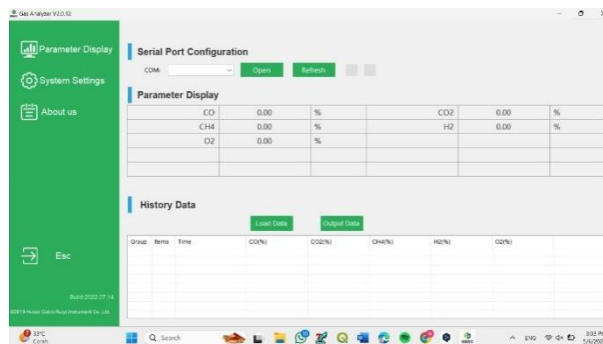
Gambar 12. Tampilan panel PISAG G3100-P.

- 9) PISAG G3100-P kemudian diatur agar dapat merekam ke memori internal, dengan pengaturan 1 data per menit dan maksimal perekaman sebanyak 2560 data.



Gambar 13. Tampilan data syngas pada waktu yang telah ditentukan.

- 10) Perekaman data juga dapat dipantau secara langsung atau *real time*, serta pemindahan data dari mesin PISAG G3100-P dengan bantuan *software gas analyzer* pada laptop yang disambungkan dengan kabel HDMI ke PISAG G3100-P, serta hasil data nantinya dalam format Microsoft Excel.



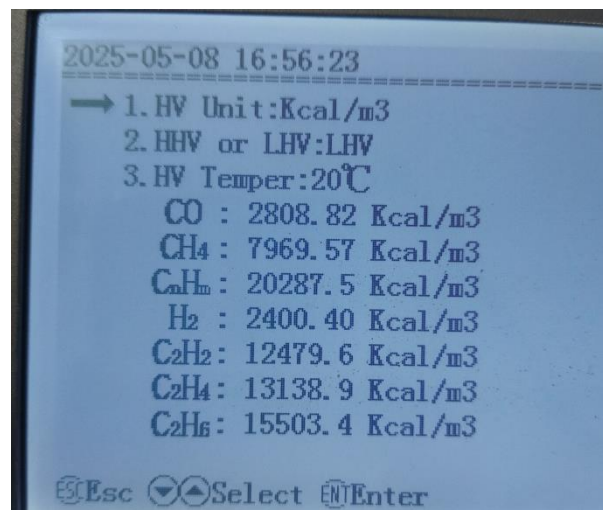
Gambar 14. Tampilan *software gas analyzer* v2.0.12.

3.4.2. Analisis *Lower heating value* (LHV) Syngas

Nilai kalor didefinisikan sebagai jumlah kalori yang dihasilkan ketika satu unit zat dioksidasi secara sempurna (Kabe *et al.*, 2004). Nilai kalor pada biomassa umumnya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *higher heating value* (HHV) dan *lower heating value* (LHV). HHV didefinisikan sebagai total panas yang dilepaskan selama proses pembakaran, termasuk panas laten dari uap air yang terbentuk. Sementara itu, LHV merupakan nilai energi bersih yang tersedia setelah dikurangi energi yang dibutuhkan untuk menguapkan kandungan air dalam bahan bakar maupun hasil pembakaran (Mujiarto *et al.*, 2023). Nilai kalor yang tinggi pada *syngas* merupakan karakteristik yang sangat diharapkan dalam proses gasifikasi karena secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi gasifikasi. Selain itu, *syngas* dengan nilai kalor tinggi bersifat mudah terbakar, sehingga lebih praktis dan efisien untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar dalam berbagai aplikasi energi (Syarif *et al.*, 2020).

Nilai kalor pada penelitian ini adalah *lower heating value* (LHV). Dalam mesin PISAG G3100-P satuan yang digunakan berupa kcal/m^3 (Gambar 15). Untuk menghitung nilai LHV menggunakan rumus sebagai berikut:

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



Gambar 15. Satuan LHV dalam mesin PISAG G3100-P.

3.4.3. Analisis Proksimat

Ash ini berasal dari hasil samping gasifikasi yang dihasilkan setelah melalui proses pirolisis. *Ash* merupakan hasil pirolisis biomassa yang dilakukan dalam kondisi lingkungan dengan kadar oksigen rendah atau tanpa oksigen sama sekali. Bergantung pada kondisinya, proses pirolisis dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama: pirolisis lambat (laju pemanasan lambat dalam waktu lama pada suhu $< 300^{\circ}\text{C}$), pirolisis moderat (suhu $300\text{-}500^{\circ}\text{C}$), dan pirolisis cepat (laju perpindahan panas yang cepat dalam waktu singkat pada suhu $> 500^{\circ}\text{C}$) (Novita *et al.*, 2021). Analisis yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik *ash* ini menggunakan analisis proksimat.

Analisis proksimat dilakukan untuk mengevaluasi kualitas pembakaran kulit kopi sebagai bahan bakar padat. Penilaian ini mencakup pengujian terhadap kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*), dan karbon terikat (*fixed carbon*). Pada analisis ini digunakan 2 bahan yaitu abu atau *ash* kulit tanduk kopi hasil gasifikasi (by-product) dan biomassa kulit tanduk kopi. Analisis yang dilakukan antara lain sebagai berikut:

3.4.3.1. Kadar Air

Penentuan kadar air dilakukan dengan menguapkan air bebas dalam bahan melalui pemanasan hingga tercapai keseimbangan antara kadar air bahan dan

kelembapan udara di sekitarnya. Pada uji kadar air menggunakan oven. Uji ini menggunakan bahan masing-masing sebanyak 1 g yang diletakkan di dalam cawan porselen. Suhu yang digunakan sebesar 100°C dengan waktu 24 jam (1 hari). Pengujian dilakukan dengan pengulangan sebanyak 3 kali. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$MC (\%) = \frac{(W_1 + W_2)}{W_1} \times 100\%$$

Keterangan:

MC= Kadar Air (%)

W1= Berat Sebelum Oven

W2= Berat Setelah Oven

3.4.3.2. Kadar Zat Terbang

Kadar zat terbang atau *volatile matter* merupakan fraksi bahan yang hilang massa akibat pemanasan dalam kondisi tanpa kehadiran udara. Uji kadar zat terbang menggunakan *muffle furnace*. Masing-masing bahan baik biomassa maupun *ash (by-product)* digunakan sebanyak 1 g. Bahan dimasukkan ke dalam cawan porselen dengan menggunakan tutup. Uji kadar zat terbang menggunakan suhu di 950°C dan selama 7 menit. Dilakukan sebanyak 3 kali ulangan untuk tiap bahan. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

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

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 g tiap bahan dalam cawan porselen dimasukkan ke dalam *muffle furnace* dengan suhu 750°C selama 1 jam dan dilakukan 3 kali ulangan. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

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

3.4.3.1. Karbon Terikat

Karbon terikat atau *fixed carbon* adalah fraksi padat yang tersisa dalam sampel setelah kadar air, kadar zat terbang, dan kadar abu dikurangi. 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 menggunakan analisis data deskriptif. Analisis deskriptif adalah metode analisis yang melibatkan pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, dan penafsiran data yang ada guna memberikan gambaran yang jelas mengenai kondisi yang diteliti (Sapuan, 2020). Data deskriptif yang dipaparkan berupa kerataan dan standar deviasi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Komposisi *syngas* melalui proses gasifikasi kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) menghasilkan beberapa komponen, yakni karbon monoksida (CO) 3,62-7,52%, karbon dioksida (CO₂) 5,2-7,02%, metana (CH₄) 0,31-0,66%, hidrogen (H₂), serta oksigen (O₂) 12,44-13,6%. Komposisi ini didominasi oleh oksigen. Hal ini menunjukkan bahwa laju udara saat proses gasifikasi tidak stabil, sehingga bahan bakar terbakar lebih cepat atau habis.
2. Laju *lower heating value* (LHV) selama proses gasifikasi bervariasi antara 256,15–417,19 kcal/m³. LHV mengalami fluktuasi nilai yang signifikan pada pertengahan proses gasifikasi hingga mencapai titik terendah pada menit ke-28 sebesar 228,41 kcal/m³. Setelah fluktuasi, nilai LHV stabil pada kisaran ~300 kcal/m³.
3. Hasil analisis proksimat berupa kadar abu dan kadar zat menguap berada pada nilai yang sesuai, tetapi kadar air pada biomassa kulit tanduk kopi maupun *ash* (*by-product*) hasil gasifikasi menunjukkan nilai yang sangat tinggi. Total karbon terikat yang dihasilkan memiliki nilai yang tinggi, mengindikasikan bahwa bahan kulit tanduk kopi sangat baik dijadikan alternatif bahan bakar, tetapi harus melalui metode khusus untuk meminimalkan kadar air yang tinggi tersebut.

5.2. Saran

Disarankan agar penelitian lanjutan dapat lebih mengeksplorasi potensi kulit tanduk kopi sebagai bahan bakar terbarukan alternatif dengan metode yang lebih beragam. Persiapan dan pengujian sampel dengan metode lain untuk mengurangi

kadar air berlebih pada bahan kulit tanduk kopi (*coffee parchment*).

Pengembangan potensi bahan kulit tanduk kopi (*coffee parchment*) yang dapat dijadikan sebagai bahan penelitian lain, seperti pembuatan pelet, briket, bahan baku pirolisis, dan torefaksi. Aplikasi metode gasifikasi juga dapat dikembangkan untuk bahan baku lainnya yang berpotensi menjadi alternatif bahan bakar atau energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, F., Mahendra, L. E., Sylvia, T., Hatta, M., Marlina, T. 2024. Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai pupuk organik di Desa Nanti Agung, Kabupaten Kepahiang, Bengkulu. *Babakti : Journal of Community Engagement*. 1(1) : 9-16.
- Amilin, J., Rachmawati, T., Sanjaya, F. J. 2025. Analisis daya saing ekspor kopi Lampung di pasar internasional dengan adanya Pergub Lampung No. 43 Tahun 2015 (2017-2021). *Glocal: Jurnal Kajian Global dan Lokal*. 2(1) : 1-20.
- Amrullah, S., Rohman, S. A., Oktaviananda, C., Ikram, F. D. 2022. Karakterisasi proses gasifikasi menjadi listrik berbahan baku sampah padat perkotaan menggunakan reaktor tipe *downdraft* di Provinsi Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. 4(2) : 21-30.
- Ardhiansyah, H., Kusumaningrum, M., Bahlawan, Z. A. S., Prasetiawan, H., Savanti, F., Fauziyyah, H. A. 2024. Green pretreatment techniques for enhanced delignification of lignocellulosic biomass: A case study of biomass waste in Indonesia. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 1381(1) : 012034.
- Aristi, M. A., Hidayat, W., Iswanto, A. H., Lubis, M. A. R. 2024. Ramie fibers from agroforestry systems as sustainable materials for functional textiles: a review. *Jurnal Sylva Lestari*. 12(3) : 962-979.
- Badan Pusat Statistik. 2024. *Statistik Produksi Kopi Provinsi Lampung 2023*. Badan Pusat Statistik. Jakarta
- Basu, P. 2010. *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press. Oxford
- Budiarto, H., Umam, F., Irawan I. 2021. *Gasifikasi: Teori, Perancangan dan Penerapannya*. Media Nusa Creative. Bangkalan.

- Chan, W. P., Yusoff, S. A. M. B., Veksha, A., Giannis, A., Lim, T. -T., Lisak, G. 2020. Analytical assessment of tar generated during gasification of municipal solid waste: distribution of GC–MS detectable tar compounds, undetectable tar residues and inorganic impurities. *Fuel*. 268 : 117348.
- Chuchita, Sari, M. R., Sinaga, A. K. G., Suastika, K. G., Karelius, Dirgantara, M., Rumbang. 2022. Proses torefaksi dengan metode batch untuk meningkatkan nilai kalor tandan kosong kelapa sawit. *Bohr: Jurnal Cendekia Kimia*. 1(1) : 1-11.
- Dayoub, E. B., Tóth, Z., Soós, G., Anda, A. 2024. Chemical and physical properties of selected biochar types and a few application methods in agriculture. *Agronomy*. 14(11) : 1-15.
- Debora, H., Wicaksono, K. P. 2020. Uji komposisi penggunaan media tanam terhadap pembibitan tanaman kopi (*Coffea arabica*). *Jurnal Produksi Tanaman*. 8(1) : 16-22.
- Dinata, F. H., Asifha, N. T., Yuono. 2022. Pengaruh rasio agen CO₂ terhadap hasil gasifikasi biomassa tempurung kelapa pada proses gasifikasi menggunakan furnace berdasarkan analisis kualitatif. *Prosiding Diseminasi FTI Genap 2021/2022*. Bandung.
- El-Nagar, R., Ghanem, A. 2019. Syngas production, properties, and its importance. *BiblioBoard Library Catalog (Open Research Library)*. Mesir.
- 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.
- 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.
- Harahap, U.S., Anggraini, S., Azmi, F., Yolanda, N., Pulungan, L. S. 2024. Produksi gas hidrogen. *Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisiplin*. 8(5) : 541-546.
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021a. Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 8(1) : 33-42.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., Yoo, J. 2021b. Valorization of Indonesian wood wastes through pyrolysis: a review. *Energies*. 14(5) : 1407.

- 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)*. 123(2) : 189-195.
- 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., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S. H., Chae, H. M. 2017. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. 62(1) : 145-152.
- 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 di Desa Bangun Sari. *Yumary Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 6(1) : 237-248.
- 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) : 2027.
- Hu, Y., Cheng, Q., Wang, Y., Guo, P., Wang, Z., Liu, H., Akbari, A. 2021. Investigation of biomass gasification potential in Syngas production: Characteristics of dried biomass gasification using steam as the gasification agent. *Energy Fuels*. 34(1) : 1033-1040.

- 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.
- Irwan, Sukainah, A., Putra, R. P. 2023. Pemanfaatan kulit tanduk biji kopi arabika (*Coffea arabica*) sebagai substrat pertumbuhan *Aspergillus niger* dalam memproduksi enzim selulase. *Mutiara: Multidisciplinary Scientific Journal*. 1(9) : 525-537.
- Iryani, D. A., Halimatuzzahra, H., Taharuddin, T., Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U. 2023. Physicochemical characterization of wood mixed with coffee waste pellet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1187(1) : 012007.
- Jia, Y., Li, Z., Wang, Y., Wang, X., Lou, C., Xiao, B., Lim, M. 2021. Visualization of combustion phases of biomass particles: effects of fuel properties. *ACS Omega*. 6(42) : 27702-27710.
- Kabe, T., Ishihara, A., Qian, E. W., Sutrisna, I. P., Kabe, Y. 2024. *1-Methods of Classification and Characterization of Coal*. Elsevier. Amsterdam.
- Karyani, T. 2020. Pelatihan budidaya BSF melalui pemanfaatan kulit buah kopi. *Dharmakarya: Jurnal Aplikasi Ipteks untuk Masyarakat*. 9(3) : 172-178.
- Kasmaniar, Yana, S., Nelly, Fitriliana, Susanti, Hanum, F., Rahmatullah, A. 2023. Pengembangan energi terbarukan biomassa dari sumber pertanian, perkebunan dan hasil hutan: kajian pengembangan dan kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1) : 4957-4964.
- Kaupp, A. 2013. *Small Scale Gas Producer-Engine Systems*. Springer Science and Business Media. New York.
- Kumar, K. V., Panwar, N. L. 2024. Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. *Clean Energy*. 8(4) : 61-78.
- Latif, M. 2015. *Pengolahan kelapa sawit dan CPO*. Program Studi Agroindustri, Politeknik Pertanian Negeri Pangkep.
- Luo, Z., Hao, R., Su, B., Liu, L., Li, D., Liu, L., Zhou, S., Wang, T. 2025. Flammability limits and near-limit kinetic behaviors of multi-component syngas: A combined experimental and numerical study. *Fuel*. 405 : 136642.
- Luthfianto, S., Nurkhanifah, N., Maula, I. 2020. Inovasi: limbah plastik dan kulit kopi menjadi paving block di Desa Penakir, Pemalang. *Dinamisia: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 4(1) : 176-185.

- Makwana, J., Dhass, A. D., Ramana, P. V., Sapariya, D., Patel, D. 2023. An analysis of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: a review. *International Journal of Thermofluid*. 20 : 1-16.
- Marčič, S. , Marčič, M., Praunseis, Z. 2016. Electricity and heat production by biomass. *Natural Resources*. 7 : 666-675.
- Mariyam, S., Alherbawi, M., Pradhan, S., Al-Ansari, T., McKay, G. 2023. Biochar yield prediction using response surface methodology: effect of fixed carbon and pyrolysis operating conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(22) : 28879-28892.
- Marulanda, V. A., Gutierrez, C. D. B., Alzate, C. A. C. 2019. Chapter 4 - *Thermochemical, Biological, Biochemical, and Hybrid Conversion Methods of Bio-derived Molecules into Renewable Fuels*. Woodhead Publishing. Monzales.
- Maulani, Q., Riniarti, M., Duryat, D., Hidayat, W. 2024. Aplikasi biochar berbahan dasar limbah kayu meranti (*Shorea spp.*) Untuk pertumbuhan mahoni (*Swietenia macrophylla*) menggunakan media tailing emas meranti (*Shorea spp.*). *Gorontalo Journal of Forestry Research*. 7(1) : 34-45.
- Mishra, S., Upadhyay, R. K. 2021. Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. *Materials Science for Energy Technologies*. 4 : 329-340.
- Mujiarto, S., Paryanto, P., Susanty, A. 2026. *Pemanfaatan Limbah Kulit Kopi Sebagai Energi dengan Menggunakan Teknologi Gasifikasi Downdraft Three-Stage Gasifier*. UNDIP Press. Semarang.
- 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.
- Nahak, B., Preetam, S., Sharma, D., Shukla, S., Syväjärvi, M., Toncu, D., Tiwari, A. 2022. Advancements in net-zero pertinency of lignocellulosic biomass for climate neutral energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 161 : 112393.
- Noer, I., Handayani, S. 2023. Supply chain of coffee bean (case study of coffee production centers in West Lampung Regency). *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*. 23(2): 262-271.

- Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., Fudholi, A. 2021. Artikel review: Parameter operasional pirolisis biomassa. *Agroteknika*. 4(1) : 53-67.
- Nurkholifah, V., Riniarti, M., Prasetya, H., Hasanudin, U., Niswati, A., Hidayat, W. 2020. Karakteristik arang dari limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan tandan kosong kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). *Prosiding Seminar Nasional Konservasi Tahun 2020*. 235-240.
- Nury, D., Luthfi, M. Z., Variyana, Y. 2023. Pengaruh Pretreatment Alkali Hidroksida Terhadap Produksi Gula Reduksi dari Limbah Kulit Kopi. *JoASCE (Journal Applied of Science and Chemical Engineering)*. 1(1) : 1-6.
- Paulauskas, R., Zakarauskas, K., Striūgas, N. 2021. An intensification of biomass and waste char gasification in a gasifier. *Energies*. 14(7) : 1983.
- Pongsiriyakul, K., Wongsurakul, P., Kiatkittipong, W., Premashthira, A., Kuldilok, K., Najdanovic-Visak, V., Adhikari, S., Cognet, P., Kida, T., Assabumrungrat, S. 2024. Upcycling coffee waste: key industrial activities for advancing circular economy and overcoming commercialization challenges. *Processes*. 12(12) : 2851.
- Prayoga, S., Riniarti, M., Prasetia, H., Setiawan, K., Bakri, S., Hidayat, W. 2025. Growth improvement of palm oil seedling using biochar from oil palm empty fruit bunch and rubber wood. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*. 14(6) : 2179-2186.
- Primadanty, R. P. 2023. Potensi biomassa dalam transisi energi di Indonesia. *Parahyangan Economic Development Review*. 2(2) : 136-143.
- Putri, M. I. D. W., Murda, R. A., Maulana, S., Octaviani, E. A., Sari, N. A., Hasibuan, M. M., Aulia, F., Hidayat, W. 2024. Hybrid biopellets characterization of gamal wood (*Gliricidia sepium*) and robusta coffee husk at various compositions. *Jurnal Sylva Lestari*. 12(3) : 595-609.
- Putta, K. R., Pandey, U., Gavrilovic, L., Rout, K. R., Rytter, E., Blekkan, E. A., Hillestad, M. 2022. Optimal renewable energy distribution between gasifier and electrolyzer for syngas generation in a power and Biomass-to-Liquid fuel process. *Frontiers in Energy Research*. 9.
- Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., Bula-Silvera, A. 2024. Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*. 12 : 101886.
- Radhiana, R., Yana, S., Affan, M., Zainuddin, Z., Susanti, S., Kasmaniar, K., Hanum, F. 2023. Strategi keberlanjutan pembangunan energi terbarukan jangka panjang indonesia: kasus biomassa energi terbarukan di sektor pertanian, perkebunan dan kehutanan Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1).

- Rafly, N. M., Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Wijaya, B. A., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S. 2022. Pengaruh pemberian biochar tandan kosong kelapa sawit terhadap pertumbuhan sengon (*Falcataria moluccana*). *Journal of Tropical Upland Resources*. 4(1) : 1-10.
- Ramalingam, S., Rajendiran, B., Subramiyan, S. 2020. Recent advances in the performance of Co-Current gasification technology: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(1) : 230-262.
- Rani, I. T., Yoo, J., Park, B. B., Hidayat, W., Wijaya, B. A., Lee, S., Kim, S., Choi, H., Chun, D., Im, H., Kim, S. 2023. Wood pellet Driven-Biochar characterization produced at different targeted pyrolysis temperatures. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(3) : 558-571.
- 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 tunggu pirolisis. *Jurnal Belantara*. 6(1) : 12-22.
- 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., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yoo, J., Kim, S., Lee, S. 2021. Using two dosages of biochar from shorea to improve the growth of *Paraserianthes falcataria* seedlings. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 749 (1): 012049.
- 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.
- Riskilillah, A., Tsani, M. K., Bintoro, A., Hidayat, W., Riniarti, M. 2024. The role of oil palm empty fruit bunches (OPEFB) biochar to increase the growth of broad leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) in planting media containing gold tailings. *Open Soil Science and Environment*. 2(2) : 49-57.
- Rismawan, R. 2013. *Peningkatan Dalam Gas Mempan Bakar Hasil Gasifikasi Arang Sekam Padi*. Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
- Sanena, T. S., Riniarti, M., Tsani, M. K., Asmarahman, C., Hidayat, W. 2024. Pengaruh pemberian biochar meranti terhadap pertumbuhan mahoni daun lebar (*Swietenia macrophylla*) pada media tanam tercemar tailing emas. *ULIN : Jurnal Hutan Tropis*. 8(2): 329-334.

- Sapuan, M. 2020. Analisis sistem informasi akuntansi penjualan dalam meningkatkan pengendalian intern perusahaan. *Jurnal Equilibiria*. 7(1) : 114-122.
- Satriananda, Khairul, N., Salim, S. 2022. Pretreatment limbah pengolahan kopi untuk menghasilkan biogas pada proses anaerobik. *Jurnal Reaksi*. 15(1) : 46-53.
- Septian, D. E., Kaswanto, R. L., Arifin, H. S. 2025. Kontribusi jasa lanskap agroforestri sebagai usaha peningkatan resiliensi ekosistem terhadap tekanan lingkungan. *Jurnal Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan*. 12(1) : 85-94.
- Septiana, L. M., Indhira, H., Afandi, A., Banuwa, I. S. 2021. Efektivitas pemberian bahan pembenah tanah terhadap distribusi agregat di lahan kering masam pada pertanaman kedelai. *Jurnal Agrotek Tropika*. 9(2) : 251.
- Septiani, R., Effendi, D. H., Miftah, A. M. 2020. Perbandingan metode produksi bioetanol dari kulit kopi. *Prosiding Farmasi SPeSIA*. 6(2) : 115-120.
- Setiawan, A., Sitepu, B. B., Muhammad, M., Anshar, K., Riskina, S., Nurjannah, S., Hakim, L. 2024. Converting Arabica *coffee parchment* into value added products: technical and economic assessment. *Coffee Science*. 19 : e192185.
- Setyawan, H. Y., Dewi, J. R., Sunyoto, N. M. S., Wijana, S. 2020. Progress on research and development of bio-oil as a fuel in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 475(1) : 1-8.
- Shahabuddin, M., Alam, M. T., Krishna, B. B., Bhaskar, T., Perkins, G. 2020. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. *Bioresource Technology*. 312 (123596).
- Sher, F., Hameed, S., Omerbegović, N. S., Chupin, A., Hai, I. U., Wang, B., Teoh, Y. H., Yildiz, M. J. 2024. Cutting-edge biomass gasification technologies for renewable energy generation and achieving net zero emissions. *Energy Conversion and Management*. 323 : 119213.
- Siagian, K. J. 2016. *Eliminasi kandungan tar pada gasifikasi tandan kosong kelapa sawit*. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas Padang.
- Syarif, A. 2020. Pengaruh variasi laju alir udara dan filter terhadap proses gasifikasi dengan sistem *downdraft*. *Kinetika*. 11(1) 36-44.
- Tajalli, A. 2015. *Panduan penilaian biomassa sebagai sumber energi alternatif di Indonesia*. Penabulu Alliance. Jakarta.

- Tiara, T., Djana, M., Mayasari, R., Anwar, H., Haviz, M., Ashruri. 2023. Pengaruh air fuel ratio (AFR) dan temperatur terhadap kadar CO₂ dari gasifikasi biomassa kayu karet (*Hevea brasiliensis*). *Jurnal Redoks*. 8 (1) : 63-69.
- Tiara, T., Djana, M., Ristanti, D. E., Yusuf, A. A. 2024. Air fuel ratio (AFR) and temperature's effects on syngas composition and calorific value using a coconut shell downdraft gasifier. In *Advances in engineering research/Advances in Engineering Research*. 121-136.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 19 : 191-215.
- Trejo, F. 2025. Review of Biomass Gasification Technologies with a Particular Focus on a Downdraft Gasifier. *Processes*. 13(9) : 2717.
- Wang, Q., Huang, R., Li, R. 2022. Impact of the COVID-19 pandemic on research on marine plastic pollution - a bibliometric-based assessment. *Mar. Policy*. 146 : 105285.
- Wati, N. E., Wahyu, Y., Mulyani, T., Suhartina. 2024. Pemanfaatan kulit kopi menjadi silase sebagai pakan alternatif kambing saburai pada kelompok tani Sidomakmur 2 Gisting Tanggamus. *Journal of Human and Education*. 4(5) : 1043-1047.
- 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. 2025. 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. 2025. Field evaluation of biochar application on the early growth of *Falcataria moluccana*: effects of pyrolysis temperatures and biochar application rates. *Jurnal Sylva Lestari*. 13(1) : 248-263.
- Wijaya, B. A., Riniarti, M., Prasetia, H., Hidayat, W., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S. 2021. Interaksi perlakuan dosis dan suhu pirolisis pembuatan biochar kayu meranti (*Shorea* spp.) mempengaruhi kecepatan tumbuh sengon (*Paraserianthes moluccana*). *Jurnal Ilmiah Kehutanan Rimba Kalimantan/ULIN : Jurnal Hutan Tropis*. 5(2) : 86-97.
- Wijaya, B., Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetia, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I., Kim, S., Lee, S., 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.

- 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., Hilmanto, 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.
- Winter, S. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Ferreira, M. V., Lopes, O. P., De Cassia Oliveira Carneiro, A., De Oliveira Araújo, S. 2025. Sustainable Solid Biofuel Production from Coffee Byproducts: Characterization and Pelletization of Husk and Parchment. *Resources*. 14(12) : 188.
- Wiyono, P. a. I. W., Stujanjono, H., Sidartawan, R., Listiyadi, D., Rozy, M. F., Sanata, A., Sholahuddin, I., Nashrullah, M. D. 2025. Pengaruh laju alir udara terhadap produktifitas Syngas gasifikasi biomassa kulit kopi. *Jurnal Permadi Perancangan Manufaktur Material Dan Energi*. 7(1) : 1-12.
- Yunita, R. S., Riniarti, M., Hidayat, W., Niswati, A., Prasetya, H., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yunita, E., Rizkasumarta, F. 2023. Improvement of Falcataria moluccana Root Growth by Giving Empty Palm Oil Fruit Bunches (EFB) Biochar in Growing Media. *Journal of Sylva Indonesiana*. 6(1) : 10-18.