ANALISIS *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis)* DAN CANGKANG KELAPA SAWIT *(Elaeis guineensis)* MENGGUNAKAN DUA TIPE *DOWNDRAFT GASIFIERS*

(Skripsi)

Oleh

EDELWEIS CIKAL BUNGA HIMAWAN
2014151071

FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024

ABSTRAK

ANALISIS *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis)* DAN CANGKANG KELAPA SAWIT *(Elaeis guineensis)* MENGGUNAKAN DUA TIPE *DOWNDRAFT GASIFIERS*

Oleh

Edelweis Cikal Bunga Himawan

Gasifikasi menggunakan biomassa seperti pelet kayu karet dan cangkang kelapa sawit memiliki potensi sebagai energi sumber terbarukan. Hasil utama dari gasifikasi dapat menghasilkan *syngas*, *syngas* ini dapat digunakan dalam menghasilkan listrik. *Downdraft gasifier* digunakan karena tipe *gasifier* ini menghasilkan tar yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan tipe *gasifier lain*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kenaikan suhu dan ketahanan dalam penggunaan kedua tipe *downdraft gasifier (Gasifier* Tipe A dan *Gasifier* Tipe B) dalam proses gasifikasi dan mengetahui komposisi hasil gasifikasi yaitu *syngas* lalu dibandingkan. Data yang diambil berupa data kenaikan suhu (℃) selama 8 jam dan komposisi senyawa *syngas* dengan dua bahan baku yang berbeda (pelet kayu karet dan cangkang inti kelapa sawit) yang dianalisis menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry)*. Ketiga hasil didapatkan bahwa memiliki ketahanan selama 8 jam dengan suhu maksimum yang berbeda-beda, untuk *Gasifier* Tipe A *feedstock* pelet kayu karet suhu tertinggi mencapai 1165℃, *Gasifier* Tipe B *feedstock* pelet kayu karet suhu tertinggi mencapai 641,2℃, *Gasifier* Tipe B cangkang inti kelapa sawit suhu mencapai 596,5℃. Selain itu komposisi senyawa tertinggi *Gasifier* Tipe A *feedstock* pelet kayu karet adalah *butanedioic acid, 2-cyano-2,3-dimethyl-, diethyl ester* ($C_{11}H_{17}NO_4$). Pada *Gasifier* Tipe B menggunakan *feedstock* pelet kayu karet dan cangkang inti kelapa sawit, komposisi senyawa tertinggi adalah *Benzeneethanamine, 3-fluoro-ß,5-dihydroxy-N-methyl-* ($C_9H_{12}FNO_2$).

Kata kunci: *syngas*, suhu, pelet kayu karet, cangkang inti kelapa sawit

ABSTRACT

ANALYSIS OF SYNGAS FROM RUBBER WOOD PELLETS (Hevea brasiliensis) AND PALM KERNEL SHELLS (Elaeis guineensis) GASIFICATION USING TWO TYPES OF DOWNDRAFT GASIFIERS

By

EDELWEIS CIKAL BUNGA HIMAWAN

Gasification using biomass such as rubber wood pellets and palm kernel shells has the potential as a renewable energy source. The main result of gasification can produce syngas, this syngas can be used to generate electricity. Downdraft gasifiers are used because this type of gasifier produces less tar when compared to other types of gasifiers. This study aims to determine the temperature increase and resistance in the use of both types of downdraft gasifiers (Type A Gasifier and Type B Gasifier) in the gasification process and to determine the composition of the gasification results, known as syngas, and then compare them. The data taken were in the form of temperature increase data (℃) for 8 hours and the composition of syngas compounds with two different raw materials (rubber wood pellets and palm kernel shells) which were analyzed using GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry). The third result obtained had a resistance for 8 hours with different maximum temperatures, for Gasifier Type A rubber wood pellet feedstock the highest temperature reached 1165℃, Gasifier Type B rubber wood pellet feedstock the highest temperature reached 641.2℃, Gasifier Type B palm kernel shell feedstock temperature reached 596.5℃. In addition, the highest compound composition of Gasifier Type A rubber wood pellet feedstock is butanedioic acid, 2-cyano-2,3-dimethyl-, diethyl ester ($C_{11}H_{17}NO_4$). In Type B Gasifier using rubber wood pellets and palm kernel shells as feedstock, the highest compound composition is 3-fluoro-ß,5-dihydroxy-N-methyl- ($C_9H_{12}FNO_2$).

Keywords: syngas, temperature, rubberwood pellet, palm kernel shell

ANALISIS *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) MENGGUNAKAN DUA TIPE DOWNDRAFT GASIFIERS

Oleh

EDELWEIS CIKAL BUNGA HIMAWAN

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA KEHUTANAN

Pada

Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung

FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian	: **Analisis *Syngas* Hasil Gasifikasi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) dan Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) menggunakan Dua Tipe *Downdraft Gasifiers***
Nama	: Edelweis Cikal Bunga Himawan
NPM	: 2014151071
Jurusan/PS	: Kehutanan
Tanggal Persetujuan	: 04 Juli 2024

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.	**Dr. Hendra Prasetia, S.Hut., M.Sc.**
NIP 197911142009121001	NIP 198904132022021001

2. Ketua Jurusan Kehutanan

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

Dipindai dengan CamScanner

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Sekertaris : **Dr. Hendra Prasetia, S.Hut., M.Sc.** .....

Anggota : **Dr. Indra Gumay F, S.Hut., M.Si.** .....

2. Dekan Fakultas Pertanian

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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **01 Juli 2024**

Dipindai dengan CamScanner

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Edelweis Cikal Bunga Himawan
NPM : 2014151071

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

"ANALISIS *SYNGAS* HASIL GASIFIKASI PELET KAYU KARET (*Hevea brasiliensis*) DAN CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) MENGGUNAKAN DUA TIPE DOWNDRAFT GASIFIERS"

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

Bandar Lampung, 04 Juli 2024
Yang menyatakan



Edelweis Cikal Bunga H.
NPM 2014151071

Dipindai dengan CamScanner

RIWAYAT HIDUP



Edelweis Cikal Bunga Himawan (penulis) yang biasa disapa Cikal, dilahirkan di Kota Metro, 8 September 2002. Penulis sebagai anak pertama dari tiga bersaudara yang merupakan anak pasangan dari Yudho H. Marhoed dan Ibu Elisabet Wahyi Biati. Penulis menempuh pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di Tamasha Falaq Pangkalpinang tahun 2007-2008, Sekolah Dasar (SD) di SDN 10 Pangkalpinang tahun 2008-2012 dan SD Negeri 1 Metro Pusat tahun 2012-2014, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 2 Metro tahun 2014-2017, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 4 Metro tahun 2017-2020. Tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi di dalam kampus maupun di luar kampus. Penulis mengikuti organisasi internal dalam kampus yaitu Himpunan Mahasiswa Kehutanan (Himasylva) sebagai Anggota Bidang Penguatan (Tahun 2022) dan Bidang (tahun 2023) dan penulis juga aktif di organisasi *English Society* (ESo) tahun 2020-2022.

Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti penulis yaitu kegiatan kuliah kerja nyata (KKN) di Desa Suka Makmur, Kecamatan Belalau, Kabupaten Lampung Barat selama 40 hari. Penulis juga mengikuti kegiatan praktik umum (PU) di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM) yaitu di KHDTK Wanagama, Gunung Kidul, Yogyakarta dan KHDTK Getas, Blora, Jawa Tengah pada bulan Agustus 2023 selama 20 hari. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen mata kuliah Sifat dan Struktur Kayu (SSK) semester Genap (2024). Penulis

menghasilkan karya ilmiah yang dipresentasikan di Bilses International Sumela Scientific Researches Congress dengan judul “Performance of Biomass Gasification Using Rubber Wood *(Hevea brasiliensis)* Pellets”.

Dengan Nama Allah SWT.

Kupersembahkan karya tulis ini untuk orang tuaku tersayang

Ayah Yudho H. Marhoed & Bunda Elisabet Wahyu Biati

Through the eyes of gratitude, everything is a miracle.

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul Analisis *Syngas* Hasil Gasifikasi Pelet Kayu Karet *(Hevea brasiliensis)* dan Cangkang Kelapa Sawit *(Elaeis guineensis)* menggunakan Dua Tipe *Downdraft Gasifiers"* 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. Hj. 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 dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Dr. Hendra Prasetia, S.Hut., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua. Terima kasih atas masukan dan saran-saran pada seluruh rangkaian proses sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku dosen penguji pada ujian skripsi. Terima kasih atas masukan dan saran-saran pada seluruh rangkaian proses sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

7. Segenap dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan dan Staff administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
8. Kepada BARISTA BRIN atas dukungan keuangan yang telah membantu biaya UKT dan penelitian yang penulis laksanakan.
9. Ayahku tersayang Yudho H. Marhoed yang telah memberikan dukungan, doa, nasihat, kasih sayang tak terhingga, serta tanggung jawab sebagai seorang ayah yang tulus kepada penulis. Terimakasih atas perjuangan serta pengorbanan yang memotivasi penulis hingga dapat bertahan sampai saat ini.
10. Bundaku Elisabet Wahyu Biati, terimakasih telah mendidik, sabar, memberikan doa, nasihat, kasih sayang, serta dukungan dalam setiap keputusan penulis. Terimakasih telah menjadi contoh seseorang yang kuat berjuang melewati tantangan sehingga penulis terus terdorong untuk berjuang dan kuat dalam melewati banyaknya hambatan dan juga dapat menyelesaikan skripsi dengan maksimal.
11. Adik-adik Penulis Janelist Arrehya Sangpuan Himawan dan Elang Raya Alfatih Artahimawan yang telah memberikan motivasi, semangat, dukungan, serta bantuan material maupun non-material selama perkuliahan ini.
12. Teman seperbimbingan yang sudah berjuang bersama dalam proses skripsi.
13. Kepada Putri yang sudah membantu Penulis, memberikan saran, menemani Penulis dalam proses pengerjaan skripsi.
14. Keluarga besar angkatan 2020 (BEAVERS) dan keluarga besar Himasylva Universitas Lampung yang telah membersamai serta membantu dalam perkuliahan.
15. 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, 04 Juli 2024

Edelweis Cikal Bunga Himawan

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI i

DAFTAR GAMBAR iii

DAFTAR TABEL iv

I. PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang dan Masalah 1

1.2 Tujuan Penelitian 4

1.3 Kerangka Pemikiran 4

II. TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Gasifikasi 6

2.2 *Downdraft Gasifier* 8

2.3 Biomassa Sebagai Energi Terbarukan 10

2.4 Penggunaan Cangkang Kelapa Sawit *(Elaeis guineensis)* sebagai Energi Terbarukan 11

2.5 Pelet Kayu 14

2.6 Kayu Karet (*Hevea brasiliensis)* Sebagai Bahan Pelet Kayu 15

III. METODOLOGI PENELITIAN 18

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian 18

3.2 Alat dan Bahan Penelitian 20
3.3 Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan 20
3.3.1 Proses Gasifikasi 20
3.3.2. Pengumpulan Sampel *Syngas* 22
3.4 Analisis Parameter 24
3.4.1. Analisis Kenaikan Suhu dan Ketahanan dari *Feedstock* Gasifikasi 24
3.4.2. Analisis Komposisi *Syngas* menggunakan *Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)* 25
3.5 Analisis Data 25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN 26
4.1 Perbandingan Kenaikan Suhu dan Ketahanan 26
4.1.1 *Gasifier* Tipe A 26
4.1.2 *Gasifier* Tipe B 30
4.2 Perbandingan Komposisi *Synthetic Gas* 34
4.2.1 Komposisi *Synthetic Gas* dengan *feedstock* Pelet Kayu Karet Menggunakan *Gasifier* Tipe A 35
4.2.2 Komposisi *Synthetic Gas* dengan *Feedstock* Pelet Kayu Karet Menggunakan *Gasifier* Tipe B 40
4.2.3 Komposisi *Synthetic Gas* dengan *Feedstock* Cangkang Inti Kelapa Sawit Menggunakan *Gasifier* Tipe B 46
V. KESIMPULAN DAN SARAN 53
5.1 Kesimpulan 53
5.2 Saran 54
DAFTAR PUSTAKA 55
LAMPIRAN 65

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

1. Kerangka Pemikiran. 5
2. Proses gasifikasi untuk memproduksi energi, gas, dan etanol dari biomassa 7
3. *Updraft gasifier* dan *Downdraft gasifier* 8
4. Alur Gasifikasi pada *Downdraft Gasifier* 9
5. Pohon kelapa sawit 12
6. Tanaman karet 16
7. *Gasifier* Tipe A 19
8. *Gasifier* Tipe B 19
9. Kenaikan suhu dan ketahanan pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A selama 8 jam 29
10. Kenaikan suhu dan ketahanan selama 8 jam menggunakan feedstock pelet kayu karet dengan *Gasifier* Tipe B 31
11. Kenaikan suhu dan ketahanan selama 8 jam menggunakan feedstock cangkang inti kelapa sawit dengan *Gasifier* Tipe B 32
12. Kromatogram feedstock pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A 36
13. Kromatogram feedstock pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe B 41
14. Kromatogram feedstock cangkang inti kelapa sawit menggunakan *Gasifier* Tipe B 46

DAFTAR TABEL

Gambar Halaman

1. Kenaikan suhu dan ketahanan pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A selama 8 jam 29
2. Kenaikan suhu dan ketahanan selama 8 jam menggunakan *feedstock* pelet kayu karet dengan *Gasifier* Tipe B 30
3. Kenaikan suhu dan ketahanan selama 8 jam menggunakan *feedstock* cangkang inti kelapa sawit dengan *Gasifier* Tipe B 32
4. Komposisi *synthetic gas* dengan *feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A..... 37
5. Komposisi *synthetic gas* dengan *feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe B. 42
6. Komposisi *synthetic gas* dengan *feedstock* cangkang inti kelapa sawit menggunakan *Gasifier* Tipe B 47

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Indonesia merupakan negara terbesar di ASEAN dalam penggunaan energi (IRENA, 2017). Hal ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan pertumbuhan konsumsi energi tercepat di dunia (IRENA, 2017). Hal ini didorong oleh pembangunan ekonomi yang kuat, peningkatan urbanisasi, dan pertumbuhan populasi yang stabil. Akan tetapi, penggunaan energi tersebut lebih banyak menggunakan energi fosil yang bersifat sumber daya tak terbarukan, kondisi ini menyebabkan ketersediaan energi fosil menjadi semakin langka (Elinur *et al.*, 2010). Menurut Lauranti dan Djamhari (2017), sumber energi yang berasal dari bahan bakar fosil menyebabkan kapasitas bahan bakar fosil menjadi menurun, terutama minyak dan gas bumi yang menjadikan salah satu faktor pemerintah untuk menjadikan energi terbarukan sebagai prioritas utama dalam menghasilkan keberlanjutan dan kemandirian energi. Potensi negara untuk energi terbarukan sangat besar, akan tetapi pemanfaatannya belum digunakan secara optimal (Lauranti dan Djamhari, 2017).

Menurut Molino *et al*. (2016), salah satu sumber energi terbarukan untuk alternatif bahan bakar fossil adalah biomassa. Dalam produksi energi terbarukan di Indonesia, biomassa memainkan peranan penting (Hidayat *et al.*, 2020). Menurut Hidayat *et al.* (2020), hal tersebut berdasarkan Kebijakan Energi Nasional di Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 pada tahun 2014 yang dimana pada tahun 2025 targetan sebanyak 23% bauran energi Indonesia berasal dari sumber-sumber terbarukan termasuk dari biomassa. Menurut Szwaja *et al.* (2019), biomassa dapat dijadikan resolusi yang tepat dan merupakan bagian

penting dalam jenis sumber energi, dikarenakan relatif murah terlebih lagi berasal dari limbah kayu dan pertanian yang mudah untuk ditemukan. Ditambah lagi Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki sumber daya biomassa melimpah dari kehutanan dan pertanian (Hidayat *et al.*, 2021). Biomassa memiliki keunggulan dalam penggunaannya antara lain: dapat digunakan secara berulang kali karena dapat terbarukan, tidak menimbulkan polusi udara seperti bahan bakar fosil, dan dapat meningkatkan pemanfaatan limbah pertanian (Adistia *et al*., 2020).

Salah satu cara untuk memanfaatkan biomassa terutama dari sumber daya hutan dapat menggunakan kayu. Menurut Bildiricia dan Özaksoy (2016), kayu masih merupakan salah satu jenis biomassa terpenting yang menentukan 87% dari total energi biomassa, baik dipanen digunakan sebagai bahan bakar atau berasal dari produk kayu. Salah satu contoh jenis tanaman yang dapat dimanfaatkan kayunya dan dikembangkan di Indonesia adalah karet. Hasil dari kayu karet selain getahnya, dapat digunakan sebagai bahan baku perabotan rumah tangga, *particle board*, MDF (*Medium Density Fibreboard*), kayu lapis, papan partikel, *wood pellet* dan sebagainya (Towaha *et al.*, 2013). *Wood pellet* dari kayu karet sendiri berasal dari pemanfaatan limbah kayu karet yang tidak terpakai dan digunakan untuk menghasilkan produk yang memiliki nilai tambah dan ramah lingkungan (Adrian *et al.*, 2015). Di antara biomassa kayu, pelet menyediakan beberapa keunggulan. Selain itu pelet kayu karet memiliki potensi untuk menjadi pengganti bahan bakar fossil dikarenakan kayu karet merupakan sumber daya terbarukan, sehingga penggunaan kayu karet dapat digunakan secara terus menerus apabila pohon karet dapat dibudidaya dan dilakukan pemeliharaan secara baik untuk masa yang akan datang.

Selain biomassa kayu, terdapat biomassa pertanian yang dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan, salah satu contohnya adalah kelapa sawit. Menurut Maruli Pardamean (2012), kelapa sawit adalah tanaman budidaya penghasil utama minyak nabati, yaitu *Crude Palm Oil* (CPO). Cangkang inti sawit menjadi salah satu limbah padat yang banyak dihasilkan dari pabrik kelapa sawit. Cangkang sawit merupakan bahan baku yang dapat berkelanjutan secara ekonomi dan lingkungan untuk industri energi terbarukan (Okoroigwe dan Saffron, 2012).

Selain itu cangkang inti kelapa sawit memiliki nilai kalor yang tinggi, hal ini menunjukkan cangkang inti kelapa sawit potensial sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan, ditambah lagi sering ditemukannya limbah cangkang inti kelapa sawit di Indonesia dapat digunakan sebagai sumber daya terbarukan yang signifikan, sehingga dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan seperti bahan bakar fosil.

Proses yang dapat digunakan untuk memanfaatkan sumber daya terbarukan seperti pelet kayu karet dan cangkang inti kelapa sawit sebagai alternatif bahan bakar dapat melalui proses gasifikasi.. Gasifikasi ini sendiri menggunakan *downdraft gasifier,* dalam *downdraft gasifier*, biomassa dan udara bergerak ke arah bawah dibagian bawah unit *gasifier* (Patra dan Sheth, 2015). Salah satu keunggulan dari *downdraft gasifier* jika dibandingkan dengan tipe *gasifier* yang lain adalah produksi *charcoal* dan tar yang dihasilkan melalui pembakaran itu rendah, serta kemampuannya untuk beradaptasi dengan jumlah udara yang dimasukkan (Rajvanshi, 2014). Menurut Yao *et al*. (2018), gasifikasi biomassa menghasilkan dua produk utama, yaitu *syngas* dan *biochar*. Gasifikasi adalah teknik termal yang disempurnakan, karena menghasilkan gas sintetis serbaguna (*syngas*) yang darinya dimungkinkan untuk memperoleh berbagai aset komoditas seperti listrik, bahan bakar, dan bahan kimia sambil membuang residu biomassa atau limbah dengan mudah (Ramos dan Rouboa, 2020). *Syngas* mengandung H_2, CO, CO_2, CH_4, H_2O, jumlah jejak hidrokarbon yang lebih tinggi, kemungkinan gas inert yang hadir dalam *gasifying agent*, dan berbagai kontaminan (Göransson *et al.,* 2011). Menurut Sikarwar *et al.* (2016), *syngas* adalah sumber penting bahan bakar dan bahan kimia ramah lingkungan. Selain itu, *syngas* adalah bahan bakar yang cocok untuk produksi listrik (Sikarwar *et al.,* 2016). Dalam proses produksi listrik tersebut, *syngas* dihasilkan dari proses pembakaran dan pirolisis pada *gasifier* dan disalurkan pada generator untuk menggerakkan turbin dan mengubah *syngas* tersebut menjadi aliran listrik.

Banyak limbah terutama limbah pertanian dan limbah hutan yang dapat dimanfaatkan sebagai biomassa dan dijadikan sebagai pelet, salah satu contohnya adalah kayu karet. Selain kayu karet terdapat cangkang sawit yang merupakan salah satu limbah padat terbesar dan belum banyak pemanfaatannya. Limbah

pertanian dan limbah hutan tersebut memiliki potensi pemanfaatan biomassa sebagai alternatif bahan bakar dalam menghasilkan listrik. Gasifikasi menjadi salah satu cara untuk menghasilkan listrik menggunakan biomassa seperti pelet kayu karet dan cangkang sawit, melalui gasifikasi juga dapat menghasilkan *synthetic gas* yang pada akhirnya akan dibandingkan komposisi gasnya dari kedua *feedstock* yang berbeda. Selain itu belum ada perlakuan tentang perbandingan hasil gasifikasi pelet kayu karet dan cangkang sawit di Indonesia, sehingga hal tersebut menjadi salah satu pertimbangan di penelitian ini dikarenakan penelitian ini terdapat tujuan untuk menganalisis hasil gasifikasi yang dihasilkan dari *gasifier* tipe *downdraft* dari All Power Labs (*Gasifier* Tipe A) dan *gasifier* Sun Brand Industrial Inc. (*Gasifier* Tipe B), menggunakan *feedstock* pelet kayu karet dan cangkang sawit dan melakukan perbandingan hasil gasifikasi diantara *synthetic gas* pelet kayu karet dan cangkang sawit.

1.2 Tujuan Penelitian

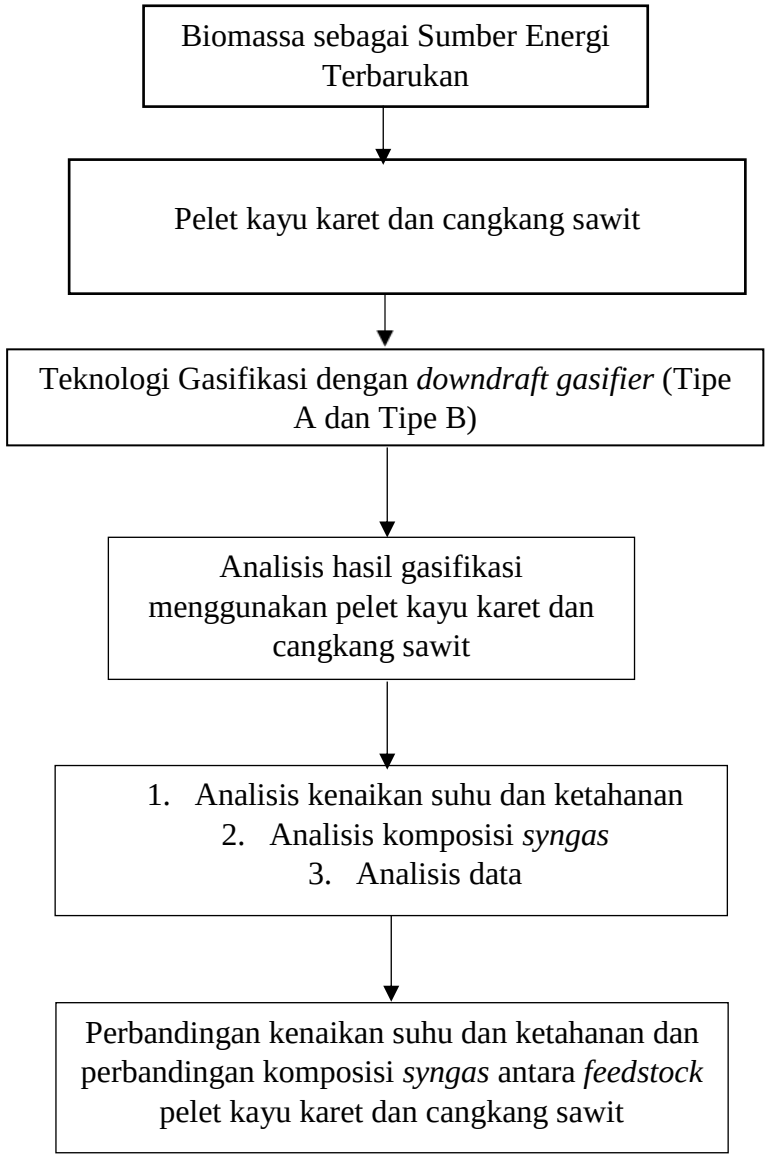
Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, penelitian ini bertujuan sebagai berikut:

1. Membandingkan kenaikan suhu dan ketahanan dari dua *feedstock* berbeda dengan menggunakan *Gasifier* Tipe A dan Tipe B,
2. Membandingkan komposisi *synthetic gas* dari dua *feedstock* berbeda, yaitu pelet kayu karet dan cangkang sawit menggunakan *Gasifier* Tipe A dan Tipe B.

1.3 Kerangka Pemikiran

Salah satu sumber daya alam yang memiliki sumber daya yang sangat kaya adalah hutan, sumber daya alam hutan yang sangat melimpah salah satu contohnya adalah kayu. Produk yang dapat dihasilkan menggunakan kayu adalah pelet kayu. Kayu yang dapat dijadikan produk pelet kayu tersebut adalah kayu karet, yang hasil akhirnya dikenal sebagai *rubberwood pellet.* Selain kayu yang menjadi daya alam hutan yang sangat melimpah, terdapat cangkang sawit yang menjadi salah satu limbah padat terbesar yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit.

Cangkang sawit berpotensi sebagai sumber energi terbarukan melalui gasifikasi. Pelet kayu karet dan cangkang sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan dengan proses gasifikasi menggunakan *gasifier* tipe *downdraft* dimana terdapat *Gasifier* Tipe A dan Tipe B, pada proses gasifikasi tersebut akan menghasilkan *syngas*. Suhu yang digunakan untuk gasifikasi sendiri mencapai ≥ 800°C. Hasil dari proses gasifikasi akan dianalisis kenaikan suhu dan ketahanan dan komposisi gasnya kemudian dibandingkan. Berdasarkan uraian tersebut dapat dilihat kerangka penelitian yang telah disajikan pada Gambar 1.

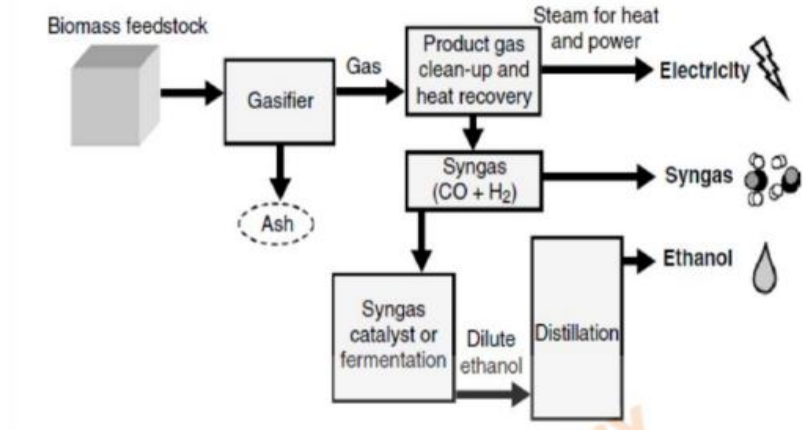


Gambar 1. Kerangka Pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

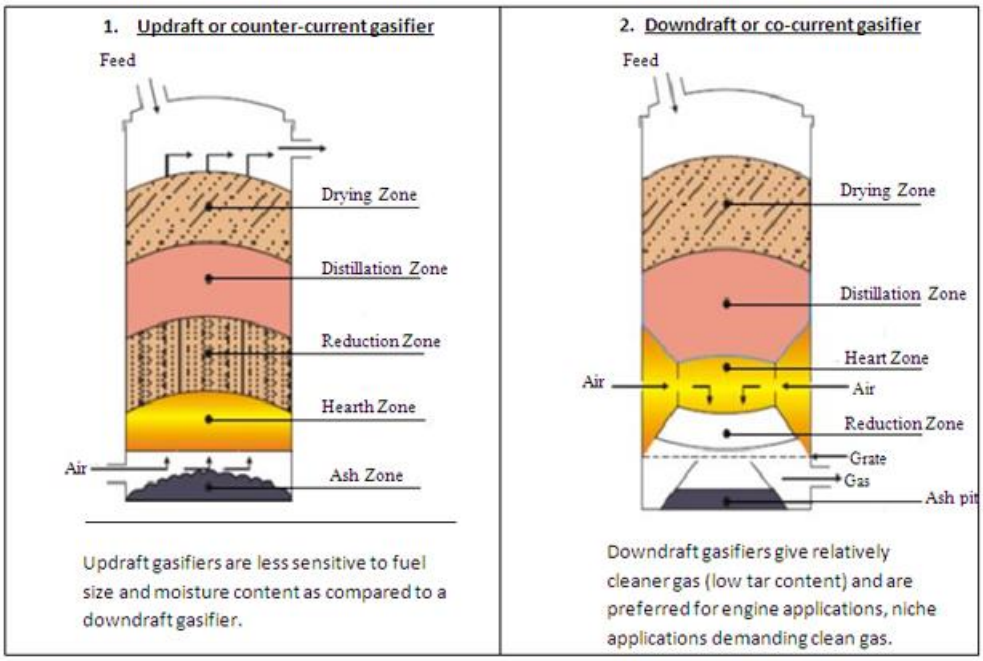
2.1 Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses termokimia di mana bahan organik atau karbon diubah dengan menggunakan *gasifier* pada suhu lebih tinggi dari 700ºC (misalnya dalam jumlah yang terkontrol) menjadi gas yang mengandung CO, H_2, CO_2, dan CH_4 (Dhyani *et al.*, 2018). Proses gasifikasi adalah suatu proses kimia yang mengubah materi berkarbon menjadi gas yang dapat terbakar, contohnya seperti *syngas* (Syardi dan Nisya, 2020). Selain itu, gasifikasi dapat menghasilkan listrik dan ethanol seperti yang telah disajikan pada Gambar 2. Bahan bakar yang digunakan dalam proses gasifikasi mencakup materi yang mengandung hidrokarbon, seperti batubara, petcoke (*petroleum coke*), dan biomassa (Syardi dan Nisya, 2020). Menurut Jennifer *et al.* (2016), karena kondisi oksidasi yang rendah, gasifikasi dapat dipandang sebagai cara yang lebih ramah lingkungan dalam menggunakan biomassa, karena emisi polutannya lebih rendah. Selain itu, gasifikasi lebih menguntungkan karena konversi biomassa menjadi gas yang mudah terbakar menjadikannya proses yang lebih efisien dibandingkan proses termokimia lainnya (Pereira *et al.*, 2012).



Gambar 2. Proses gasifikasi untuk memproduksi energi, gas, dan etanol dari biomassa (Basu, 2010)

Menurut Luo *et al.* (2018), gasifikasi biomassa telah dianggap sebagai jalur yang efektif untuk pemanfaatan sumber daya hayati. Korberg *et al.* (2021) mengatakan gasifikasi biomassa adalah salah satu teknologi konversi biomassa terkemuka. Menurut Situmorang *et al.* (2020), gasifikasi biomassa untuk menyediakan bahan bakar gas untuk pembangkit listrik dianggap sebagai salah satu cara terbaik untuk menggantikan bahan bakar fosil. Menurut Gonzales dan Sandoval (2020), gasifikasi biomassa adalah salah satu sumber bioenergi yang paling menjanjikan karena dapat dianggap sebagai proses yang paling hemat biaya dan efisien. Menurut Abineno dan Koylal (2018), jika dibedakan berdasarkan arah aliran, gasifikasi dapat dibedakan menjadi dua yaitu, gasifikasi aliran searah (*downdraft gasification*) dan gasifikasi aliran berlawanan (*updraft gasification*) seperti pada Gambar 3.



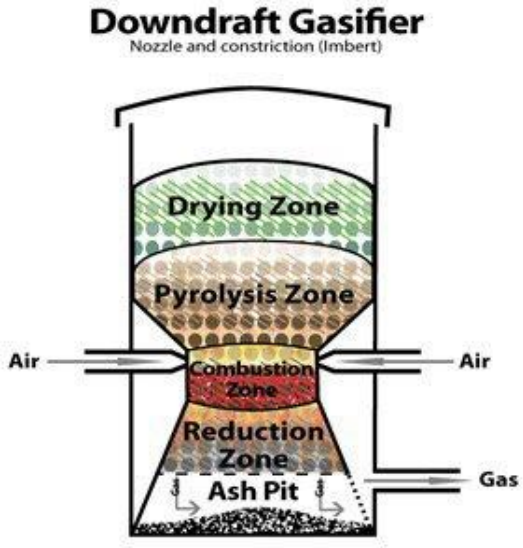
Gambar 3. *Updraft gasifier* dan *downdraft gasifier* (Source: http://agronomyday.cropsci.illinois.edu/2010/tours/c3chips/)

2.2 *Downdraft Gasifier*

Menurut Valderrama *et al.* (2018), *downdraft gasifier* adalah yang paling tepat untuk gasifikasi biomassa dan menghasilkan gas sintesis tar rendah (antara kurang dari 1 hingga 30 g/Nm^3). *Downdraft gasifier* lebih cocok untuk digunakan pada mesin pembakaran internal meskipun dengan jumlah bahan partikulat yang lebih besar dan dengan kebutuhan untuk didinginkan karena suhu tinggi yang keluar dari *gasifier* (Mednikov, 2018). Desain mereka lebih kompleks daripada *updraft gasifier* karena dibangun dari dua cangkang konsentris (Panwar *et al.*, 2012). Menurut Rahman *et al.* (2020), jumlah tar yang rendah karena dikeluarkan melalui zona pembakaran, di mana beberapa molekul berantai panjang dipecah. *Syngas* mengandung abu dan debu dalam jumlah tinggi (Rahman *et al.*, 2020). Ukuran bahan bakar lebih terbatas daripada *updraft gasifier* (berukuran seragam antara 4 dan 10 mm), dan kadar air biomassa harus <25% (Rahman *et al.*, 2020). Menurut Rahman *et al.* (2020), temperatur keluar gas juga secara signifikan lebih tinggi daripada *updraft gasifier*, membutuhkan unit pendingin yang lebih besar. Pengurangan tar dapat mencapai 99,9% dari tar yang terbentuk, membutuhkan pembersihan

tar minimal atau tanpa pembersihan tar, juga modifikasi pada *gasifier* ini dapat mengurangi lebih banyak kandungan tar dalam *syngas* hingga 0,01 g/Nm^3 (Rahman *et al.*, 2020).

Downdraft gasifier biasanya dirancang untuk bahan baku kepadatan tinggi, seperti kayu dan pelet biomassa. Menurut Kumar *et al.* (2019), *downdraft gasifier* adalah jenis *gasifier* yang paling umum. Bahan baku biomassa diumpankan dari atas, sementara udara dialirkan ke bawah dan gas produser keluar dari dasar *gasifier* seperti pada Gambar 4. Menurut Khosasaeng dan Suntivarakorn (2017), zona oksidasi berada di bawah zona pirolisis, dan zona reduksi berada di bawah zona oksidasi dikarenakan udara dilewatkan dalam arah yang sama dengan bahan baku biomassa. Campuran bersih dari gas yang mudah terbakar di aliran keluar diperoleh (Kumar *et al.*, 2019). Keuntungan utamanya adalah gas produser diproduksi dengan kandungan tar yang rendah, yang akan cocok untuk mesin gas (Kumar *et al.*, 2019). Menurut Pereira *et al.* (2017), posisi zona oksidasi dengan demikian merupakan parameter kritis dalam desain *downdraft gasifier.*



Gambar 4. Alur Gasifikasi pada *Downdraft Gasifier* (Source: https://www.teriin.org/technology/biomass-gasifier-for-thermal-and-power-applications)

2.3 Biomassa Sebagai Energi Terbarukan

Biomassa didefinisikan sebagai produk organik dari pertanian, perkebunan dan kehutanan yang dikembangkan untuk bahan bakar, dari limbah dan fasilitas pengolahan limbah (Yulianto *et al.,* 2020). Biomassa adalah sumber daya energi paling melimpah keempat yang berkontribusi lebih dari 10% dari kebutuhan energi global (Sikarwar et al., 2016). Menurut Chen *et al*. (2017), energi biomassa telah menarik lebih banyak perhatian di masa lalu. Hal tersebut bisa menjadi pilihan yang lebih baik untuk menggantikan bahan bakar fosil konvensional dalam waktu dekat. Menurut Gonzalez dan Sandoval (2020), biomassa merupakan sumber energi yang memiliki potensi besar untuk digunakan dalam sistem kelistrikan terdesentralisasi di pedesaan melalui berbagai kemungkinan model penggunaan, terutama melalui proses termokimia seperti pembakaran atau gasifikasi daripada melalui proses biokimia untuk menghasilkan bahan bakar cair atau produk kimia lainnya, karena pada masyarakat kecil ini dengan kebutuhan listrik hingga beberapa ratus kW (kilowatt). Biomassa memiliki peran mendasar untuk mengembangkan sumber energi terbarukan (Hamedani et al., 2019). Menurut Teixeiraa et al. (2018), selain sebagai sumber energi terbarukan, biomassa memiliki beberapa manfaat, yaitu sebagai alternatif bahan bakar fosil, menggunakan kembali limbah, terjangkau, dan mendorong reboisasi.

Menurut Eurostat (2015), pemanfaatan sisa-sisa hutan dan pertanian serta limbah biomassa lainnya dari kegiatan pertanian dan industri untuk produksi bio-energi (terutama listrik dan panas) memainkan peran kunci dalam sistem energi. Salah satu contoh biomassa tersebut adalah biomassa kayu. Biomassa kayu berupa sisa panen kayu merupakan sumber energi potensial terbarukan yang banyak tersedia dan tersedia cukup untuk memenuhi kebutuhan energi global di masa depan (Lauri *et al.,* 2014). Menurut Hamedani *et al.* (2019), biomassa kayu memiliki potensi yang cukup besar untuk keperluan energi terutama setelah proses pemadatan yang mengubah bahan-bahan ini menjadi *biofuel* padat dengan kepadatan energi yang lebih tinggi.

Di Indonesia, kayu merupakan biomassa yang sudah dikenal masyarakat sejak lama dan merupakan sumber energi terbarukan. Menurut Maharjoeno (2005), potensi biomassa yang berasal dari kayu meliputi: serbuk gergaji, limbah kayu lapis dan limbah kayu. Selain ketersediaan biomassa kayu dari Indonesia, umumnya tidak berdampak negatif terhadap lingkungan. Menurut Wilk *et al.* (2019), berbagai sumber biomassa tersedia, khususnya yang berasal dari kayu (misalnya residu hutan dan lansekap), pertanian (jerami, rumput, industri makanan) dan limbah organik lainnya. Menurut Milovanović *et al.* (2018), komposisi biomassa kayu sangat bervariasi tergantung pada jenis biomassa yang digunakan, sedangkan kualitasnya tergantung pada lokasi geografis, variasi komposisi (spesies pohon), kondisi iklim tempat pohon tumbuh, dan teknologi pemanenan yang digunakan.

Selain kayu terdapat limbah biomassa kelapa sawit yang sering ditemukan di Indonesia dan memiliki potensi menjadi sumber energi terbarukan (Putra *et al*., 2016). Indonesia menjadi negara kedua setelah Malaysia yang menjadi produsen minyak kelapa sawit terbesar di Asia Tenggara bahkan di dunia (Husin *et al.*, 2020). Limbah biomassa kelapa sawit dapat menjadi sumber energi alternatif yang bersifat energi terbarukan (Putra *et al*., 2016). Kalimantan Barat menjadi salah satu contoh dalam penggunaan limbah kelapa sawit untuk menghasilkan energi listrik, sistem pembangkitan energi listrik yang dilakukan mirip dengan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (Putra *et al*., 2016).

2.4 Penggunaan Cangkang Kelapa Sawit *(Elaeis guineensis)* sebagai Energi Terbarukan

Pohon kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) diperkenalkan ke Indonesia pada tahun 1848 dari Afrika Barat dan kemudian menyebar ke Asia Tenggara (Henson, 2012). Perkebunan kelapa sawit terkonsentrasi di daerah tropis dengan kondisi iklim dan tanah yang sesuai, seperti di Indonesia (Hambali dan Rivai, 2017). Perkebunan kelapa sawit di Indonesia kini paling banyak di tujuh provinsi: Sumatera Selatan, Sumatera Utara, Riau, Jambi, Kalimantan Barat,

Kalimantan Tengah, dan Kalimantan Timur (Nabila *et al.*, 2023). Dengan demikian, produksi buah kelapa sawit meningkat secara signifikan, hal ini menjadikan minyak kelapa sawit menjadi salah satu komoditas unggulan bagi Indonesia (Haryanto *et al.*, 2021)..



Gambar 5. Pohon kelapa sawit (RadarSuara.com)

Klasifikasi pohon kelapa sawit sebagai berikut:

Kerajaan : Plantae
Divisi : Magnoliophyta
Kelas : Liliopsida
Bangsa : Monocotyledonae
Famili : Arecaceae
Marga : *Elaeis*
Jenis : *Elaeis guineensis*

Indonesia merupakan negara produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia, memasok sekitar 60% minyak sawit yang digunakan di dunia (Nabila *et al.*, 2023). Menurut Harahap *et al.* (2020), industri kelapa sawit merupakan bisnis pertanian terpenting di Indonesia dan menyumbang sekitar 7,5% dari total ekspor. Hal ini menyebabkan produktivitas yang lebih tinggi, produktivitas yang tinggi dan nilai ekonomis minyak kelapa sawit yang lebih baik telah menyebabkan penggunaannya yang luas di banyak industri, termasuk makanan, kosmetik, dan *biofuel* (Tobi *et al*., 2019). Permintaan minyak kelapa sawit telah meningkat sedemikian rupa sehingga kini menjadi minyak nabati yang paling banyak diproduksi di dunia (Bazargan *et al.*, 2015).

Dalam kerajaan tumbuhan, kelapa sawit memiliki fitur unik: buahnya mengandung dua minyak dengan komposisi yang sangat berbeda. Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) menghasilkan dua jenis minyak dari buahnya: minyak sawit mentah dari daging buahnya dan minyak inti dari bijinya (Campos dan Caligari, 2017). Pabrik kelapa sawit merupakan tempat dimana tandan buah segar (TBS) diolah menjadi minyak kelapa sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) dan minyak inti sawit atau *palm kernel oil* (PKO). Di sektor energi, produk utamanya adalah biodiesel berbasis *crude palm oil* (CPO). Pengolahan TBS menjadi CPO meliputi pemasakan, perontokan, *digestion*, pengepresan, pengendapan, pemurnian, dan pengeringan. Proses pengepresan menghasilkan produk limbah, yaitu biji/serat. Proses selanjutnya adalah pemisahan biji dan serat yang diikuti dengan pengeringan, pemecahan biji, pemisahan inti/kulit, pengeringan, pengepresan, dan penyaringan hingga dihasilkan PKO (Hambali dan Rivai, 2017). Produk sampingan yang diperoleh dari proses ini meliputi tandan buah kosong, serat, cangkang, dan limbah cair (Hambali dan Rivai, 2017). Cangkang yang didapatkan melalui produk sampingan dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

Seiring dengan banyaknya kegunaan minyak sawit, permintaan minyak sawit terus meningkat (Noerrizki *et al.,* 2019). Menurut Kuss *et al.* (2015), hal ini dikarenakan minyak sawit mudah dikonversi menjadi biodiesel. Selain minyak sawit, cangkang inti sawit berpotensi juga sebagai bahan bakar biomassa dikarenakan memiliki kualitas terbaik jika dibandingkan bagian kelapa sawit lainnya (Yunus *et al.,* 2012). Cangkang inti sawit memiliki distribusi ukuran yang seragam sehingga mudah dihancurkan dan ditangani dengan aktivitas biologis terbatas karena kadar air rendah atau tidak ada (Yunus *et al.,* 2012). Peningkatan produksi kelapa sawit setiap tahunnya menyebabkan meningkatnya tingkat akumulasi biomassa cangkang inti sawit atau *palm kernel shells* (PKS) (Umar *et al.,* 2020).

Menurut Okoli (2020), cangkang sawit merupakan bahan berserat keras yang membungkus kacang atau biji buah inti sawit. Cangkang ini diperoleh sebagai sisa limbah dari pemecahan biji sawit dan ekstraksi kacang di pabrik, dan merupakan sekitar 34,5 persen dari satu buah sawit segar yang matang

(Okoli, 2020). Cangkang sawit ditemukan menjadi sumber energi terbarukan yang menarik dengan konduktivitas panas yang tinggi (Kareem *et al.,* 2018). Hal ini yang membuat cangkang sawit memiliki potensi untuk melengkapi pasokan energi negara-negara berkembang melalui teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan (Kareem dan Babatunde, 2018).

2.5 Pelet Kayu

Pelet kayu merupakan salah satu komoditas biomassa padat yang diperdagangkan secara internasional dan digunakan secara khusus untuk keperluan energi. Pelet kayu juga kadar air rendah dan kepadatan energi yang relatif tinggi (Sikkema *et al.,* 2011). Kadar air rendah dan kepadatan energi yang relatif tinggi pada pelet kayu ini berpotensi sebagai pengganti bahan bakar fosil. Hal ini menjadikan pelet kayu dapat berkontribusi untuk digunakan sebagai bahan bakar *renewable electricity* untuk menggantikan bahan bakar fosil, selain itu penggunaan pelet kayu diharapkan dapat mengurangi gas emisi rumah kaca (Sikkema *et al.,* 2011).

Menurut Amirta (2018), pelet kayu adalah *biofuel* yang terbuat dari bahan organik atau biomassa terkompresi. Pelet merupakan biomassa yang ukurannya diperkecil, kemudian dipadatkan sehingga menghasilkan bentuk silindris yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Rani *et al.,* 2020). Dilihat dari sejarahnya, produksi *wood pellet/energy pellet* dimulai di dunia tepatnya di Eropa dan Amerika Utara, penyebabnya adalah krisis minyak yang terjadi pada tahun 1973-1979 (Amirta, 2018). *Wood pellet* pada awalnya diproduksi untuk digunakan sebagai alternatif pengganti minyak, terutama untuk pemanas, karena mengandung kerapatan dan kualitas bahan bakar yang tinggi (Goh *et al.,* 2012). Pelet kayu adalah bahan bakar yang ramah lingkungan apabila dibandingkan dengan bahan bakar fosil (U.S. International Pellet Association, 2013). Dibandingkan dengan bahan bakar biomassa lainnya, pelet mudah ditangani, disimpan, dan diangkut, dan digunakan sebagai bahan bakar untuk pemanas dan pembangkit listrik serta kombinasi panas dan tenaga.

Area hutan yang luas dimana kawasan hutan Indonesia mencapai 125 juta ha dan keanekaragaman hayati yang tinggi sebagai sumber bahan baku

menjadikan Indonesia sangat berpotensi sebagai produsen pelet kayu (Hidayat *et al*., 2022). Melalui hutan yang luas ini menghasilkan sejumlah besar biomassa yang dapat diubah menjadi produk bernilai tambah untuk menyediakan bahan baku alternatif bagi industri kayu (Hartono *et al.,* 2016). Menurut Kementerian Kehutanan dan Lingkungan Hidup (2019), 55% hutan Indonesia atau 69 juta ha lahan hutan telah dialokasikan untuk produksi kayu. Produksi kayu tersebut dapat menghasilkan limbah kayu yang sudah diambil produk primernya dan tidak terpakai. Limbah-limbah kayu ini juga dapat dimanfaatkan untuk dijadikan sebagai pelet kayu.

Langkah pertama dalam proses pembutan pelet kayu adalah kayu akan diubah menjadi serbuk kayu dengan melakukan beberapa kali proses pencacahan agar mendapatkan hasil serbuk kayu yang halus. Setelah itu dilakukan pemadatan serbuk kayu dengan menggunakan mesin kompresi, mesin kompresi sendiri menghasilkan panas untuk mengeluarkan zat lignin dalam kayu. Ketika dikompresi, serbuk langsung dipadatkan dan dipotong, kemudian dilanjutkan dengan melewati tangki pendingin atau *cooling tower* untuk mendinginkan dan mengeraskan serbuk (Amirta, 2018).

2.6 Kayu Karet (*Hevea brasiliensis)* Sebagai Bahan Pelet Kayu

Pohon karet (*Hevea brasiliensis*) dibudidayakan untuk produksi lateks di wilayah tropis seluas lebih dari 10 juta ha (Hytönen *et al.*, 2019). Asia menyumbang 97% pasokan karet alam dunia dan penyumbang terbesar adalah Indonesia (Fox dan Castella, 2013). Masyarakat Indonesia juga banyak memilih untuk menanam pohon karet dikarenakan menghasilkan produk utama getah karet dan limbah hasil penebangan yang dapat menjadi sumber pendapatan bagi petani hutan rakyat (Hidayat *et* al., 2021; Rubiyanti *et* al., 2019) . Awalnya, pohon karet ditanam secara luas untuk produksi karet alam (Teoh *et al.*, 2011). Menurut Akhter (2005), lateks dapat dipanen secara ekonomis dari pohon karet selama 25–30 tahun, dengan produksinya yang menurun secara bertahap, sejumlah besar kayu karet dapat diperoleh selama penanaman kembali. Menurut Hytönen *et al.* (2019), kayu karet ini merupakan

bahan baku yang bagus untuk industri pembuatan produk kayu (misalnya, kayu gergajian, kayu lapis, papan partikel, furnitur, pelet kayu).



Gambar 6. Tanaman karet (kompasiana.com)

Klasifikasi pohon karet sebagai berikut:

Kerajaan : Plantae
Divisi : Spermatophyta
Kelas : Angiospermae
Bangsa : Dycotyledonae
Famili : Euphorbiaciae
Marga : *Hevea*
Jenis : *Hevea brasiliensis*

Kayu karet (*Hevea brasiliensis Muell. Arg*) merupakan bahan baku yang penting bagi industri berbasis kayu baik di Indonesia, Thailand, dan Malaysia (Shigematsu *et al.*, 2011). Kayu karet *(Hevea brasiliensis)* adalah komoditi kehutanan yang memiliki potensi besar di Indonesia (Ridjayanti *et al.*, 2023). Kayu karet utamanya digunakan dalam industri furnitur rumah tangga sebagai bahan baku (Laosena *et al.*, 2022). Kayu karet juga terkenal dengan potensinya yang besar sebagai sumber energi. Dibandingkan dengan jenis biomassa lainnya, kayu karet memiliki potensi produksi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan tandan kosong dan cangkang sawit (Ratnasingam *et al.*, 2015). Selain itu, pelet berbahan dasar kayu karet juga mempunyai beberapa keunggulan, yaitu mempunyai sifat pemanasan yang lebih baik dan seragam

per satuan volume, menghasilkan lebih sedikit emisi partikulat selama pembakaran, dan biaya transportasinya lebih rendah karena kepadatan curahnya yang meningkat (Ratnasingam *et al.,* 2015).

Bahan bakar pelet untuk kenaikan suhu dan tenaga sangat penting, jenis pelet yang paling umum dan paling banyak digunakan adalah pelet kayu yang dibuat dari aliran samping dari penggergajian kayu dan pembuatan produk kayu (Proskurina *et al.,* 2015). Selama puluhan ribu tahun, umat manusia telah membakar kayu untuk menghasilkan panas dan energi, dan pelet kayu adalah bentuk modern dari pemanas kayu yang memiliki potensi lebih besar untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO_2) daripada sumber energi terbarukan lainnya yang tersedia saat ini (Proskurina *et al.,* 2015). Pelet kayu tidak seperti kayu mentah, dimana mengandung kadar air yang sangat rendah dan menghasilkan sedikit abu, sehingga hampir semua bahan dibakar dan diubah menjadi panas (Proskurina *et al.,* 2015). Pelet kayu dapat digunakan dalam kompor pelet, boiler dan tungku dalam kekuasaan dan panas gabungan dan pembangkit listrik serta di rumah-rumah pribadi (Proskurina *et al.,* 2015). Tergantung pada aplikasinya, pelet bisa dibentuk baik untuk bahan bakar perumahan atau pelet industri (Proskurina *et al.,* 2015).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan November tahun 2023 sampai bulan Juni 2024 di Workshop Teknologi Hasil Hutan dengan perlakuan gasifikasi menggunakan *downdraft gasifier* All Power Labs (*Gasifier* Tipe A) dan Sun Brand Industrial Inc. (*Gasifier* Tipe B). Sedangkan penyiapan alat dan bahan disiapkan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Untuk pengambilan sampel *syngas* dan analisis kenaikan suhu dan ketahanan dilakukan di Workshop Teknologi Hasil Hutan di Laboratorium Lapangan Terpadu Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Analisis komposisi *syngas* dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Jawa Tengah.

Gasifier Tipe A

- Merk/Model: *All Power Labs* (APL)
- Kapasitas: 15 kWh
- Negara: Amerika



Gambar 7. *Gasifier* Tipe A

Gasifier Tipe B

- Merk/Model: Sun Brand Industrial Inc.
- Kapasitas: 30 kWh
- Negara: Korea Selatan



Gambar 8. *Gasifier* Tipe B

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *rubberwood pellet* dan cangkang sawit sebanyak 25 kilogram. Alat yang digunakan untuk melakukan penelitian adalah *downdraft Gasifier* Tipe A sebesar 15 kWh dan *Gasifier* Tipe B sebesar 30 kWh, biosolar, botol penyemprot, *hand-held lighting torch,* tedlar bag.

3.3 Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan

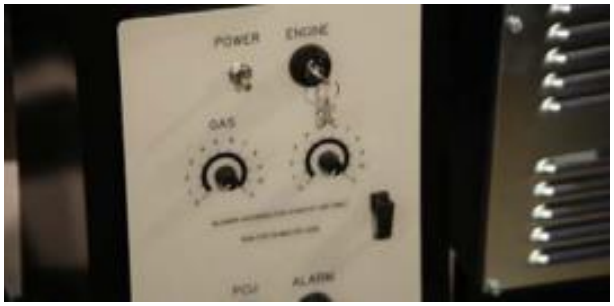
Cangkang sawit dan pelet kayu karet sudah didapatkan dari bahan penelitian sebelumnya. Cangkang sawit dan pelet kayu karet yang dibutuhkan sebanyak 25 kg dari masing-masing jenis.

3.3.1 Proses Gasifikasi

Sebelum mesin dioperasikan harus dilakukan *leak testing* atau uji kebocoran untuk menghindari risiko kebakaran internal dan kerusakan permanen pada mesin. Setelah dilakukan *leak testing* dan tidak ditemukan kebocoran, hal selanjutnya yang dilakukan adalah mengisi *feedstock* pada *gasifier.*



1) Masukkan *biochar* yang sudah dihaluskan pada *hopper* yang berguna sebagai *starter* saat mesin pertama kali dinyalakan



2) Hidupkan sakelar daya dan tunggu beberapa detik hingga otomatisasi *power pallet* menyala



3) **Indikator:** *Auger* akan mengaktifkan dan mengisi reaktor dengan *biochar*, hal ini dapat diamati melalui *viewport* di atas *PyroReactor* jika diinginkan



4) Isi *hopper* dengan *feedstock* yang sudah ditentukan dan kencangkan tutup *hopper*, pastikan tutupnya aman untuk menahan segel kedap gas



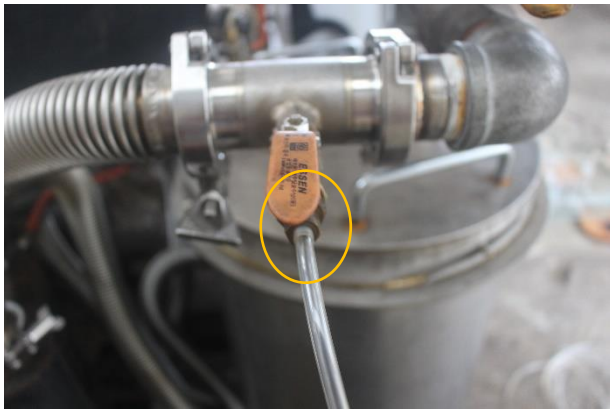
5) **Indikator:** Saat reaktor penuh, sakelar bahan bakar akan mematikan *auger* secara otomatis

Hal selanjutnya yang dilakukan setelah mengisi *feedstock* kedalam *gasifier* adalah menyalakan *gasifier*. Buka katup pada arah *flare* dan tutup katup pada arah *engine*. Selanjutnya buka katup pada bagian *air intake*. Hidupkan sakelar daya dan naikkan *gas* dan *air blower* hingga angka 4. Gunakan *hand-held lighting torch* untuk menyalakan *gasifier* melalui *lighting port*. Asap yang keluar pada *flare stack* menandakan terjadinya pembakaran pada mesin. Ketika indikator suhu (*Trst*) pada *PCU Panel* menunjukkan suhu 80°C, tutup *lighting port* untuk mencegah udara masuk. Kemudian naikkan *gas* dan *air blower* hingga angka 11 (maksimal).

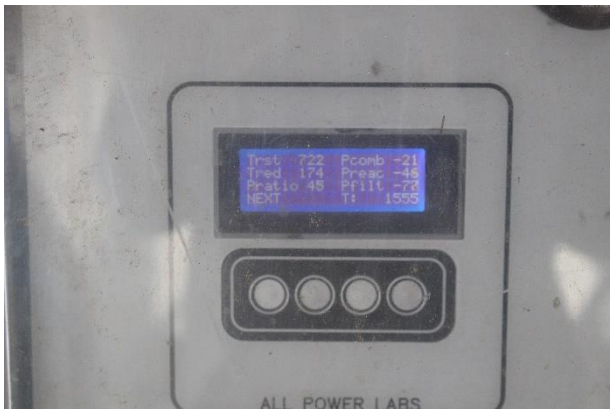
Hal selanjutnya yang dilakukan adalah mematikan *gasifier*. Dinginkan *gasifier* dengan menurunkan gas dan air blower hingga angka 4. Kemudian tutup kembali saluran air intake dan tunggu hingga suhu menurun ke 400°C. Ketika suhu sudah menurun, matikan sakelar daya. Setelah seluruh proses selesai dilakukan, kumpulkan ash sisa pembakaran pada bagian *cyclone*.

3.3.2. Pengumpulan Sampel *Syngas*

Syngas merupakan gas sintesis yang dihasilkan oleh proses gasifikasi. Produksi *syngas* dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis biomassa, jenis reaktor *gasifier*, dan *air-fuel ratio* (AFR). Biomassa yang berbeda menghasilkan kualitas *syngas* yang berbeda pula. Sampel *syngas* yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah sebanyak dua sampel yang berasal dari dua *feedstock* yang berbeda. Proses pengumpulan sampel *syngas* dijelaskan pada langkah-langkah dibawah:



1) Sebelum mesin *gasifier* dinyalakan, pastikan bahwa selang untuk mengambil sampel *syngas* sudah terpasang pada katup saluran gas *gasifier*



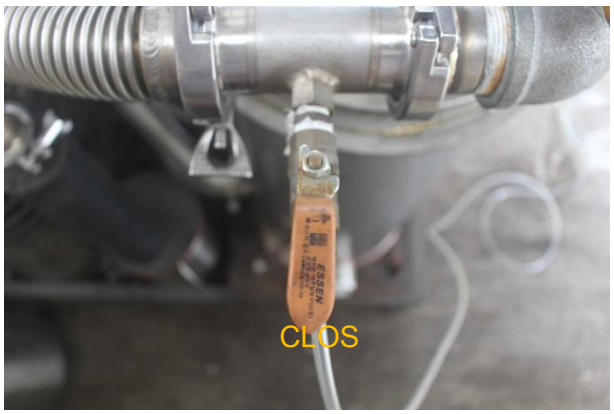
2) Sampel *syngas* dapat diambil saat indikator suhu (*Trst*) sudah mencapai 700°C



3) Pasang *tedlar bag* pada ujung selang yang telah tersambung dengan saluran gas *gasifier*



4) Buka katup saluran gas dan biarkan sampai *tedlar bag* terisi penuh



5). Lepaskan *tedlar bag* yang telah terisi penuh dari selang, kemudian tutup katup saluran gas *gasifier*

3.4 Analisis Parameter

3.4.1. Analisis Kenaikan Suhu dan Ketahanan dari *Feedstock* Gasifikasi

Perubahan kenaikan suhu dihitung dari proses pemasukan *feedstock* sampai *feedstock* habis terbakar. Kenaikan suhu dihitung setiap 10 menit sampai *feedstock* habis terbakar lalu dilakukan pencatatan. Setelah itu dibandingkan kenaikan suhu dan ketahanan antara dua jenis *gasifier* berbeda, yaitu *Gasifier* Tipe A dan *Gasifier* Tipe B selama 8 jam.

3.4.2. Analisis Komposisi *Syngas* menggunakan *Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)*

Setelah sampel *syngas* sudah berada di dalam *tedlar bag, tedlar bag* disimpan di Workshop Teknologi Hasil Hutan dengan menyesuaikan suhu ruang dan tidak berada didekat alat yang berbahaya (alat yang melakukan proses pembakaran). Setelah itu sampel *syngas* dikirim untuk dianalisis komposisi *syngas* di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada dengan menggunakan wadah kardus yang dibalut dengan *bubble wrap.* Sesampainya di LPPT UGM, sampel *syngas* disimpan terlebih dahulu dengan menyesuaikan suhu ruang, setelah itu sampel masuk antrian uji dan kemudian diuji.Analisis komposisi *syngas* menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography/Mass Spectrometry)* dari *Thermo Scientific*. Alat GC (*Gas Chromatography*) akan mengidentifikasi terlebih dahulu sampel yang hendak diperiksa, kemudian setelah itu diidentifikasi dengan alat MS *(Mass Spectrometry)*. Analisis komposisi *syngas* dilakukan di LPPT Universitas Gadjah Mada dengan metode *Headspace GC-MS*, masing-masing sampel dimasukkan ke dalam botol sampel dan siap diinjeksikan ke dalam GCMS dengan spesifikasi: column HP-5MS UI, length 30 m, ID 0,25 mm, film 0,25 µm, max. temperatur 325/350℃. GCMS dikondisikan dengan UHP *Helium Gas Carrier* (He), Suhu injektor 200℃, suhu agitator 40℃, inkubasi 1 menit, suhu syringe 40℃, *split flow* 20 ml/min, *split ratio* 20, *front inlet flow* 1,00 mL/min, MS *transfer line temp*. 230℃, *ion source temp*. 230℃, *mass range* 10-400 (AMU), *purge flow* 3 ml/min, *gas saver flow* 5 ml/min, gas saver time 5 menit. Selain itu diketahui bahwa column HP-5MS GCMS yang terdapat pada LPPT UGM untuk *flammable gas* hanya dapat mengidentifikasi gas methana (CH_4) dan karbon monoksida (CO), sedangkan hidrogen (H_2) tidak bisa.

3.5 Analisis Data

Setelah mendapatkan beberapa hasil dari parameter-parameter yang dievaluasi tersebut, kemudian dilakukan analisis data melalui analisis statistik deskriptif yaitu menampilkan data hasil penelitian yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dibandingkan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah:

1. Kenaikan suhu dan ketahanan *Gasifier* Tipe A dan *Gasifier* Tipe B mengalami kenaikan suhu secara stabil dan konsisten selama 8 jam. Walaupun kedua *gasifier* mengalami ketahanan selama 8 jam sebaiknya dalam mengoperasikan *gasifier* tidak membutuhkan waktu yang lama, penggunaan *gasifier* secara terus menerus dapat menyebabkan beberapa masalah, diantaranya yang sering terjadi adalah kebocoran pada alat dan terhambatnya pipa yang terdapat di *gasifier*. Jika hal ini dibiarkan dapat menyebabkan penurunan kualitas *syngas* yang dihasilkan dan dapat mengalami kesulitan dalam menaikkan suhu di proses gasifikasi. Cara mencegah permasalahan tersebut adalah sebelum dan sesudah menggunakan *gasifier,* lebih baik mengecek pipa yang terdapat di *gasifier* apa terdapat kebocoran atau tidak dan bersihkan pipa setiap selesai digunakan.
2. Komposisi *syngas* yang dihasilkan dari ketiga hasil komposisi *syngas* mengandung komponen utama dalam s*yngas* yaitu CO dan merupakan salah satu komposisi senyawa terbesar di ketiga hasil komposisi *syngas*. Selain itu terdapat N_2 pada *syngas feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A dengan relatif area terbesar kelima bersamaan dengan $C_7H_{14}O_2$. Komposisi senyawa *syngas* terbesar pada ketiga hasil bukan CO, N_2, H_2, CO_2, dan CH_4 yang merupakan referensi atau target senyawa yang diinginkan, melainkan pada *feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A, komposisi senyawa terbesar adalah *butanedioic acid, 2-cyano-2,3-dimethyl-, diethyl ester* ($C_{11}H_{17}NO_4$). Pada *feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe B, komposisi senyawa terbesar adalah *Benzeneethanamine, 3-fluoro-ß,5-dihydroxy-N-methyl-* ($C_9H_{12}FNO_2$) Sedangkan pada *feedstock* cangkang inti

kelapa sawit menggunakan *Gasifier* Tipe B, komposisi senyawa terbesar adalah *Benzeneethanamine, 3-fluoro-ß,5-dihydroxy-N-methyl-* ($C_9H_{12}FNO_2$). Selain itu komposisi *syngas* dengan *feedstock* pelet kayu karet menggunakan *Gasifier* Tipe A hanya sedikit kandungan tar didalam gasnya jika dibandingkan dengan *syngas feedstock* pelet kayu karet dan cangkang inti kelapa sawit menggunakan *Gasifier* Tipe B dikarenakan adanya kandungan *benzene* dan merupakan salah satu komposisi senyawa terbesar jika dibandingkan komposisi gas lainnya. Terlalu banyak tar tidak bagus untuk *syngas* dikarenakan dapat mengurangi kemampuan pembakaran dari *syngas.* Selain itu banyaknya kandungan tar akan mengurangi efisiensi penggunaan biomassa.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan diperlukannya penelitian lebih lanjut seperti menganalisis kandungan senyawa yang dihasilkan dari *synthetic gas* untuk mengetahui apakah kandungan *syngas* yang dihasilkan memiliki dampak pada pembakaran yang dilakukan pada *gasifier* atau tidak.

DAFTAR PUSTAKA

Abineno, J. C., dan Koylal, J.A. 2018. Gasifikasi Limbah Tempurung Kemiri Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Updraft *Gasifier* Pada Laju Aliran Udara Berbeda. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung.* 7(3), 175-180

Abubackar, H. N., Veiga, M. C., dan Kennes, C. 2019. *Syngas Fermentation for Bioethanol and Bioproducts. Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches,* 207–221.

Adistia, N. A., Nurdiansyah, R. A., Fariko, J., Vincent, dan Simatupang, J. W. 2020. Potensi Energi Panas Bumi, Angin, Dan Biomassa Menjadi Energi Listrik Di Indonesia. *Tesla*. 22(2).

Adrian, A., Sulaeman, R., dan Oktorini, Y. 2015. Karakteristik Wood Pellet Dari Limbah Kayu Karet (Hevea Brazilliensis Muell. Arg) Sebagai Alternatif Sumber Energi Terbarukan. *Jom Foperta*, 2(2).

Akhter, K. 2005. Preservative treatment of rubberwood (Hevea brasiliensis) to increase its service life. *The International Research Group in Wood Protection*, Stockholm.

Amirta, R. 2018. *Pellet Kayu Energi Hijau Masa Depan*. Mulawarman University Press. Samarinda.

Arief, A. 2005. *Hutan dan Kehutanan*. Kanisius. Yogyakarta.

Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory.* UK Elsevier

Bildiricia, M., Özaksoy, F. 2016. Woody Biomass Energy Consumption and Economic Growth in Sub-Saharan Africa. *Procedia Economics and Finance*, 38, 287-293.

Campos, H., Caligari, P. D. 2017. Genetic improvement of tropical crops Vol. 661. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Chen, G.Y., He, S.R., Cheng, Z.J., dan Guan, Y.N. 2017. Many studies have investigated the pyrolysis behavior of different manures using TG analysis and different kinetic analysis methods. *Bioresour. Technol.* 243, 69–77.

Chojnacki, J., Najser, J., Rokosz, K., Peer, V., Kielar, J., dan Berner, B. 2020. Syngas Composition: Gasification of Wood Pellet with Water Steam through a Reactor with Continuous Biomass Feed System. *Energies.* 13, 4376.

Christian, A., Asmara, S., Sugianti, C., dan Telaumbanua, M. 2018. Unjuk kerja alat pemotong kelapa sawit tipe dodos secara manual dan mekanis menggunakan mesin Husqvarna327 LDx. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 7(1), 15.

Devi, T. G., dan Kannan, M. P. 2007. X-ray Diffraction (XRD) Studies on the Chemical States of Some Metal Species in Cellulosic Chars and the Ellingham Diagrams. E*nergy & Fuels 21*, 596-601.

Dhyani V, dan Bhaskar T. 2018. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renew Energy* 2018; 129:695–716.

Elinur, Priyarsono, D. S., Tambunan, M., dan Firdaus, M. 2010. Perkembangan Konsumsi dan Penyediaan Energi Dalam Perekonomian Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Economics (IJAE)*, 2(1).

El-Nagar, R. A., dan Ghanem, A. A. 2019. *Syngas production, properties, and its xii importance* (Vol. 2). IntechOpen London, UK.

Farzad, S., Mandegari, M.A., dan Görgens, J.F. 2016. A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal*, *3*(4), 483-495.

Fusi, A., Bacenetti, J., Proto, A.R., Tedesco, D.E.A., Pessina, D., dan Facchinetti, D. 2021. Pellet Production from Miscanthus: Energy and Environmental Assessment. *Energies.*

Fox, J., dan Castella, J. C. 2013. Expansion of rubber (Hevea brasiliensis) in mainland Southeast Asia: What are the prospects for smallholders? *J. Peasant Stud*. 40, 155–170.

Bazargan, A., Kostić, M. D., Stamenković, O. S., Veljković, V. B., dan McKay, G. 2015. A calcium oxide-based catalyst derived from palm kernel shell gasification residues for biodiesel production. *Fuel*, 150, 519-525.

Goh, C.S.; Junginger, M.; Cocchi, M.; Marchal, D.; Thrän, D.; Hennig, C.; Heinimö, J.; Nikolaisen, L.; Schouwenberg, P.; Bradley, D.; Hess, R.; Jacobson, J.; Ovard, L.; dan Deutmeyer, M. 2013. *Wood pellet market and trade: a global perspective. Biofuels, Bioproducts and Biorefining,* 7(1), 24–42.

Gonzales, C.A.D., dan Sandoval, L.P. 2020. Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 134; 110180.

Göransson, K., Söderlind, U., He, J., dan Zhang, W. 2011. Review of syngas production via biomass DFBGs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 482–492.

Gu, X., Ma, X., Li, L., Liu, C., Cheng, K., dan Li, Z., 2013. Pyrolysis of poplar wood sawdust by TG-FTIR and Py–GC/MS. *J Anal Appl Pyrolysis* 102, 16–23.

Hambali, E., dan Rivai, M. 2017. The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1), p. 012050. IOP Publishing.

Hamedani, S.R., Colantoni, A., Galucci, F., Salerno, M., Silvestri, C., dan Villarini, M. 2019. Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. *Biomass and Bioenergy Vol*. 129, 105334.

Hajati, S., Ghaedi, M., Yaghoubi, S., 2015. Local, cheep and nontoxic activated carbon as efficient adsorbent for the simultaneous removal of cadmium ions and malachite green: Optimization by surface response methodology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 21, 760-767.

Harahap, F., Leduc, S., Mesfun, S., Khatiwada, D., Kraxner, F., Silveira, S., Meeting the bioenergy targets from palm oil based biorefineries: an optimal configuration Indonesia. *Applied Energy*, 278, 115749.

Hartono, R., Wahyudi, I., Febrianto, F., Dwianto, W., Hidayat, W., Jang, J., dan Kim, N. 2016. Quality improvement of oil palm trunk properties by close system compression method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(2), 172-183.

Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., dan Hidayat, W. 2021. Biomass Fuel From Oil Palm Empty Fruit Bunch Pellet: Potential And Challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 8(1), 33-42.

Hedayati, A., Sefidari, H., Boman, C., Skoglund, N., Kienzl, N., dan Öhman, M. 2021. Ash transformation during single-pellet gasification of agricultural biomass with focus on potassium and phosphorus. *Fuel Processing Technology* 217.

Henson, I.E. 2012. A brief history of the oil palm. In *Palm oil* (pp. 1-29). AOCS Press.

Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., dan Haryanto, A. 2020. Peningkatan Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit melalui Torefaksi Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*. 14(2).

Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetia, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., dan Lee, S. 2021. Characteristics of biochar produced from the harvesting wastes of meranti (Shorea sp.) and oil palm (Elaeis guineensis) empty fruit bunches. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 749, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.

Hidayat, W., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D. A., Haryanto, A., Amrul, Yoo, J. H., Kim, S. D., Lee, S. H., dan Hasanudin, U. 2021. Effects of Torrefaction Using COMB Dryer/Pyrolizer on the Properties of Rubberwood *(Hevea brasiliensis)* and Jabon *(Anthocephalus Cadamba)* Pellets. *Advances in Engineering Research*, 202, 209-213.

Horvat, A., Kwapinska, M., Xue, G., Dooley, S., Kwapinski, W., dan Leahy, J.J. 2016. *Detailed Measurement Uncertainty Analysis of Solid-Phase Adsorption—Total Gas Chromatography (GC)-Detectable Tar from Biomass Gasification*. 30(3), 2187-2197.

Husin, H., Hayati, A.P., Zhafran, M., Sidiq, M.A., Rinaldi, A., Fitria, B., dan Bindar, Y. 2020. Utilization of oil palm biomass as a renewable and sustainable energy source in Aceh Province. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *67*(2), 97-108.

Hytönen, J., Nurmi, J., Kaakkurivaara, N., Kaakkurivaara, T. 2019. Rubber tree (Hevea brasiliensis) biomass, nutrient content, and heating values in Southern Thailand. *Forests*, 10 (8), 638.

IRENA. 2017. Renewable Energy Prospects: Indonesia, a REmap analysis, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi

Islam, M.A., Morton, D.W., Johnson, B.B., Pramanik, B.K., Mainali, B., dan Angove, M.J., 2018. Opportunities and constraints of using the innovative adsorbents for the removal of cobalt (II) from wastewater: a review. *Environ. Nanotechnol. Monit Manag*. 10, 435–456.

Iswanto, T., Rifa'i, M., Rahmawati, Y., dan Susianto, S. 2015. Desain Pabrik *Synthetic Gas (Syngas)* dari Gasifikasi Batu Bara Kualitas Rendah sebagai Pasokan Gas PT Pupuk Sriwidjaja. *Jurnal Teknik ITS*, *4*(2), F145-F148.

Jennifer, H., Nader, M., dan Ehsan, M., 2016. Simulation of air-steam gasification of woody biomass in a bubbling fluidized bed using Aspen Plus: a comprehensive model including pyrolysis, hydrodynamics and tar production. *Biomass Bioenergy* 95, 157–166.

Jin, J. W., Li, Y. A., Zhang, J. Y., Wu, S. C., Cao, Y. C., Liang, P., Zhang, J., Wong, M. H., Wang, M. Y., Shan, S. D., dan Christie, P. 2016. Influence of pyrolysis temperatur on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *J. Hazard. Mater*. 320, 417e426.

John, I., Magdalene, A. M., Tarmizi, S. S. S., dan Shirley, J. T. 2019. *A model to manage crude palm oil production system*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 255, p. 02001). EDP Sciences.

Kalinci, Y., Hepbasli, A., dan Dincer, I., 2009. Biomass-based hydrogen production: a review and analysis. *Int. J. Hydrog. Energy*.

Kareem, B., Babatunde, D.D. 2018. Optimization of Energy Content of Palm Kernel Shell (PKS) Using Modelling Approach. *International Journal of Advance Industrial Engineering*, *6*, 111-117.

Kareem, B., Oladosu, K.O., Alade, A.O., dan Durowoju, M.O. 2018. Optimization of combustion characteristics of palm kernel-based biofuel for grate furnace. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *9*, 457-472.

Kerdsuwan, S., dan Laohalidanond, K. 2011. Renewable energy from palm oil empty fruit bunch. *Renewable energy-trends and applications*, *6*, 123-150.

Khosasaeng, T., dan Suntivarakorn, R. 2017. Effect of equivalence ratio on an efficiency of single throat downdraft *gasifier* using RDF from municipal solid waste. *Energy Procedia* 2017;138:784e

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2019. Statistik 2019 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan, Kebijakan Kehutanan. Bogor.

Koch, M., dan Biegun, M. K. W. 2020. Faithful scanning electron microscopic (SEM) visualization of 3D printed alginatebased scaffolds. *Bioprinting*, *e00098.* doi:10.1016/j.bprint.2020.e00098

Korberg, A.D., Mathiesen, B.V., Clausen, L.R. dan Skov, I.R. 2021. The role of biomass gasification in low-carbon energy and transport systems. *Smart Energy*, *Vol. 1* 100006.

Kumar, R. M. D., dan Anand, R. 2019. Chapter 5 - Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its applications. *Advanced Biofuels Applications, Technologies and Environmental Sustainability Woodhead Publishing Series in Energy*, 129-151.

Kuss, V. V., Kuss, A. V., Da Rosa, R. G., Aranda, D. A. G., dan Cruz, Y. R. 2015. Potential of biodiesel production from palm oil at Brazilian Amazon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1013–1020.

Lanjekar, P. R., Panwar, N. L., dan Agrawal, C. 2023. A comprehensive review on hydrogen production through thermochemical conversion of biomass for energy security. *Bioresource Technology Reports*, *21*, 101293.

Laosena, R., Palamanit, A., Luengchavanon, M., Kittijaruwattana, J., Nakason, C., Lee, S.H., dan Chotikhun, A. 2022. Characterization of Mixed Pellets Made

from Rubberwood *(Hevea brasiliensis)* and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel. *Fuel Materials*, 15, 3093.

Lauranti, M., dan Djamhari, E.A. 2017. *Transisi Energi yang Setara di Indonesia: Tantangan dan Peluang*. Friedrich Ebert Stiftung. Jakarta.

Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., dan Obersteiner, M. 2014. Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy* 66, 19-31.

Luo, X., Wu, T., Shi, K., Song, M., dan Rao, Y. 2018. Biomass Gasification: An Overview of Technological Barriers and Socio-Environmental Impact. *Gasification for Low-grade Feedstock.*

Maharjoeno, E. 2005. *Energi Alternatif Penggenti BBM: Potensi Limbah Biomassa Sawit Sebagai Sebagai Sumber Energi Terbarukan*. Lembaga Riset Perkebunan Indonesia. Jakarta.

Manyuchi, M. M., Sukdeo, N., Stinner, W., dan Mutusva, T. N. 2021. Influence of sawdust based biochar on gold tailings wastewater heavy metal contaminants removal. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 81–91.

Maruli Pardamean, Q. I. A. 2012. *Sukses membuka kebun dan pabrik kelapa sawit*. Penebar Swadaya.

Mednikov, A. S. 2018. A review of technologies for multistage wood biomass gasification. *Therm Eng*. 65(8), 531–46.

Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I, dan Baričević, A. 2018. Wood biomass ash as a raw material in concrete industry. *GRAĐEVINAR* 716, 505-514

Molino, A., Chianese, S., dan Musmarra, D. 2016. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25, 10-25.

Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Lee, S., dan Yoo, J. 2023. Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *176*, 113193.

Nageeb, M., ME Soltan, E. R., Ahmed, M.M . dan Abdou, A. N. A. 2018. Heavy metals removal from wastewater by adsorption on modified physically activated sewage sludge. *Arch. Org. Inorg. Chem. Sci*, 1 (1).

Noerrizki, A. M., Putri, T. K., dan Ernah, E. 2019. Utilization of palm oil waste as bioenergy. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, *3*(1), 48-66.

Okoli, I. C. 2020. Oil Palm Tree Wastes 6: Uses of the palm kernel shell. *Tropical Research Reference Platform, 1*.

Okoroigwe, E. C., Saffron, C. M. 2012. Determination of bio-energy potential of palm kernel shell by physicochemical characterization. *Nigerian Journal of Technology*, *31*(3), 329-335.

Panwar, N.L., Kothari, R., dan Tyagi, V.V. 2012. Thermochemical conversion of biomass - ecofriendly energy routes. *Renew Sustain Energy Rev*. 16(4): 1801–16.

Parinduri, L., dan Parinduri, T. 2020. Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2).

Patra, T. K., dan Sheth, P. N. 2015. Biomass gasification models for downdraft *gasifier*: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 583-593.

Pereira, E. G, dan Martins M. A. 2017. *Gasification technologies. In: Encyclopedia of sustainable technologie*s; 2017. p. 315e25.

Pereira, E. G., Silva, J. N. D., Oliveira, J. L. D., dan Machado, C. S. 2012. Sustainable energy: *A review of gasification technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4753-4762.

Pereira, M. F., Nicolau, V. P., dan Bazzo, E. 2018. Exergoenvironmental analysis concerning the wood chips and wood pellets production chains. *Biomass and Bioenergy* 119:253-262.

Proskurina, S., Heinimö, J., Mikkilä, M., dan Vakkilainen, E. 2015. The wood pellet business in Russia with the role of North-West Russian regions: Present trends and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 730–740.

Putra, A. D., Yusuf, I., dan Gani, U. A. 2016. Studi Potensi Limbah Biomassa Kelapa Sawit sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT. Pekerbunan Nusantara XIII PKS Parindu. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, *2*(1).

Rahman, M. M., Henriksen, U. B., Ahrenfeldt, J., dan Arnavat, M. P. 2020. Design, construction and operation of a low-tar biomass (LTB) *gasifier* for power applications. *Energy* 2020, 204.

Rajvanshi, A. K. 2014. *Biomass Gasification.* India Press. Nimbkar Agricultural Research Institute, Maharashtra.

Ramos, A., dan Rouboa, A. 2020. Syngas production strategies from biomass gasification: Numerical studies for operational conditions and quality indexes. *Renewable Energy* Vol. 115, 1211-1221.

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. J*urnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(1), 63-70.

Rapagna, ` S., dan Latif, A., 1997. Steam gasification of almond shells in a fluidised bed reactor: the influence of temperatur and particle size on product yield and distribution. Biomass Bioenergy 12, 281–288.

Ratnasingam, J., Ramasamy, G., Wai, L. T., Senin, A.L., dan Muttiah, N. 2015. The prospects of rubberwood biomass energy production in Malaysia. *BioResources*, 10, 2526-2548.

Ridjayanti, S. M., Bazenet, R. A., Banuwa, I. S., Riniarti, M., dan Hidayat, W. 2023. Karakteristik Arang Kayu Karet *(Hevea Brasiliensis)* Yang Diproduksi Menggunakan Dua Tipe Tungku Pirolisis. Jurnal Belantara, 6(1), 12-22.

Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., dan Bakri, S. 2019. Karakterisasi Pelet Kayu Karet (Hevea brasiliensis) Hasil Torefaksi dengan Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari.* 7(3).

Shigematsu, A., Mizoue, N., Kajisa, T., dan Yoshida, S. 2011. Importance of rubberwood in wood export of Malaysia and Thailand. *New For*. 41, 179-189.

Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Shah, N., Anthony, E. J., dan Fennell, P. S ., 2016. An overview of advances in biomass gasification. *Energy Environ. Sci*. 9, 2939–2977.

Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. T., dan Faaij, A. 2011. *The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. Biofuels, Bioproducts and Biorefining,* 5(3), 250–278.

Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., dan Guan. G. 2020. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 117, 109486.

Strelko, J. V., Malik D. J., dan Streat, M. 2002. Characterization of the surface of oxidized carbon adsorbents. *Carbon N Y*. 40:95–104.

Sulaiman, F., Suhendi, E., Prastuti, N., dan Choir, O. A. 2019. The Effect of Temperatur and Time of Gasification Process and The Addition of Catalyst to The Composition of The Combustible Gas from The Wastes of Tobacco Leaves With *Gasifier* Updraft. *FLYWHEEL: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, 1-8.

Syardi, N.R., dan Nisya, R.N. 2020. *Pengaruh Equivalence Ratio Dan Ukuran Biomassa Pada Gasifikasi Pelet Kayu Sengon Dengan Menggunakan Downdraft Gasifier.* Skripsi. Institut Teknologi Nasional Bandung. Bandung.

Szwaja, S., Magdziarz, A., Zajemska, M. dan Poskart, A. 2019. A torrefaction of Sida hermaphrodita to improve fuel properties. Advanced analysis of torrefied products, *Renewable Energy*, Vol. 141, 894–902.

Teixeiraa, T. R., Ribeiroa, C. A. A. S., Santosb, A. R. D., Marcattic, G. E., Lorenzona, A. S., Castroa, N. L. M. D., Dominguesa, G. F., Leitea, H. G.,

Menezesd, S. J. M. D. C. D., Motaa, P. H. S., Almeida Tellesa, L. A. D. A., dan Vieira, R. D. S. 2018. Forest biomass power plant installation scenarios. *Biomass and Bioenergy* Vol. 108, 35-47.

Teoh, Y. P., Don, M. M., dan Ujang, S. 2011. Assessment of the properties, utilization, and preservation of rubberwood (*Hevea brasiliensis*): a case study in Malaysia. *Journal of Wood Science*, 57, 255-266.

Tobi, A. R., Dennis, J. O., Zaid, H. M., Adekoya, A. A., Yar, A., & Fahad, U. 2019. Comparative analysis of physiochemical properties of physically activated carbon from palm bio-waste. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3688-3695.

Tounsadi, H., Khalidi, A., Abdennouri, dan M., Barka, N., 2016. Activated carbon from Diplotaxis Harra biomass: Optimization of preparation conditions and heavy metal removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 59, 348-358.

Towaha, J., Daras, U., dan Balitri. 2013. Peluang Pemanfaatan Kayu Karet *(Hevea braziliensis Muell. Arg*) Sebagai Kayu Industri. *Warta Penelitian Dan Pengembangan Tanaman Industri*, 19(2).

Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Said, M. A. B. M., dan Ahmad, R. K. 2020. Palm kernel shell as potential fuel for syngas production. In *Advances in Manufacturing Engineering: Selected articles from ICMMPE 2019* (pp. 263-273). Springer Singapore.

USIPA (U.S. International Pellet Association). 2013. *The Outlook for Wood Pellet Demand. In: USIPA 3rd Annual Exporting Pellets Conference.* Paris, France.

Valderrama, R. M. L., Gonzalez, A. M., Lora, E. E. S., dan Almazan, D. O. O. A. 2018. Reduction of tar generated during biomass gasification: a review. *Biomass Bioenergy 2018*; 108:345–70

Wilk, M., Magdziarz, A., Jayaraman, K., Chargot, M. S., dan Gökalp, I. 2019. Hydrothermal carbonization characteristics of sewage sludge and lignocellulosic biomass. A comparative study. *Biomass and Bioenergy* Vol. 120, 166-175.

Wu, Y., Liang, J., Rensing, K., Chou, T.-M., dan Libera, M. 2014. Extracellular Matrix Reorganization during Cryo Preparation for Scanning Electron Microscope Imaging of Staphylococcus aureus Biofilms. *Microscopy and Microanalysis* 20(5), 1348-1355,

Yao, Z., You, S., Ge, T., dan Wang, C. 2018. Biomass gasification for syngas and biochar co-production: Energy application and economic evaluation. *Applied Energy* Vol. 209, 42-55.

Younger, P. L., Ban wart, S. A., dan Hedin, R. S. 2002. *Mine Water*. Kluwer Academic Publishers London, p. 442.

Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudin, U., & Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 9(2), 104-111.