

Pemanfaatan Limbah Kulit Buah Kakao Sebagai Bahan Bakar Reaktor Gasifikasi Tipe Downdraft Kapasitas 960 Liter di Kabupaten Berau

Feri Putra Prakus Tidar¹⁾, dan Renal Fajri²⁾

^{1,2}Perawatan Mesin, Politeknik Sinar Mas Berau Coal

^{1,2}Jalan Raja Alam 2 Kelurahan Sei Bedung Kecamatan Tanjung Redeb, Kabupaten Berau, 77311

E-mail: feri@polteksimasberau.ac.id¹⁾, renalfajri@polteksimasberau.ac.id²⁾

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kinerja reaktor gasifikasi dengan bahan bakar limbah kulit buah kakao tipe *downdraft* sebagai salah satu solusi teknologi untuk mendapatkan sumber energi alternatif terbarukan yang dapat menggantikan energi fosil dari minyak bumi dan gas alam. Proses gasifikasi dilakukan pada reaktor yang terbuat dari material baja karbon tahan panas SS310, dengan dimensi reaktor yaitu diameter 35 cm dan tinggi 250 cm, yang dipasangkan 7 unit *thermocouple* tipe-K di sepanjang dinding reaktor sesuai zona gasifikasi, serta kapasitas pemasukan bahan bakar secara kontinyu sebesar 4 Kg/jam. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan suhu pada zona oksidasi yaitu 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C. Pengambilan data dilakukan pada variasi suhu berbeda dan diolah untuk mengetahui parameter dari kinerja reaktor gasifikasi yaitu komposisi gas, distribusi suhu pada dinding reaktor serta nilai energi panas LHV dari *syngas* yang diproduksi. Hasil penelitian ini menunjukkan nilai suhu tertinggi reaktor pada zona *drying* 205 °C, zona pirolisis 575 °C dan zona reduksi 520 °C didapatkan pada suhu zona oksidasi 1100 °C. Sedangkan nilai optimum kualitas *syngas* didapatkan pada suhu zona oksidasi 1000 °C dengan komposisi *flammable syngas* CO, H₂, dan CH₄ adalah 27,08 %, 8,53% dan 2,41% dengan nilai LHV tertinggi yaitu 5206 kJ/m³. Secara umum peningkatan suhu oksidasi memberikan pengaruh yang positif terhadap parameter utama unjuk kerja reaktor gasifikasi berbahan bakar limbah kulit buah kakao.

Kata Kunci: Gasifikasi, *Syngas*, Reaktor *Downdraft*, Suhu Oksidasi, Kinerja Reaktor, Limbah Kakao

Utilization of Cocoa Pod Husk Waste as Fuel for Downdraft Type Gasification Reactor of a Capacity of 960 Liters in Berau Regency

ABSTRACT

This experiment aims to investigate the performance characteristics of a downdraft gasification reactor fueled by cocoa pod husk as a technological solution for obtaining alternative renewable energy sources to replace fossil fuels and natural gas. The research was conducted experimentally on a gasification reactor made of SS310 thermal-resistant carbon steel material. The reactor has dimensions of 35 centimeters in diameter and 250 centimeters in height. Measurements in the gasification zone were performed using seven K-type thermocouples installed along the reactor wall. Fuel was fed continuously at a rate of 4 kg/hour. The research involved varying the temperature in the oxidation zone at 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, and 1100 °C. Data collection was carried out at these different temperature variations and processed to determine the performance parameters of the gasification reactor, including gas composition, temperature distribution along the reactor wall, and the lower heating value (LHV) of the syngas produced. The results showed the highest temperature distribution in the drying zone (205 °C), pyrolysis zone (575 °C), and reduction zone (520 °C), obtained at an oxidation temperature of 1100 °C. Meanwhile, the optimum syngas quality was achieved at an oxidation temperature of 1000 °C, with the composition of flammable syngas CO, H₂, and CH₄ being 27.08%, 8.53%, and 2.41%, respectively, and the highest LHV of 5206 kJ/m³. In general, increasing the oxidation temperature contributed positively to the performance of the gasification reactor using cocoa pod husk waste.

Keywords: *Gasification, Syngas, Downdraft Reactor, Oxidation Temperature, Reactor Performance, Cocoa Waste*

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang sangat luas dengan populasi penduduk terbesar ke-5 di dunia yaitu sekitar 275 juta orang. Dengan populasi manusia yang

besar dan meningkat setiap tahunnya, maka mengakibatkan kebutuhan energi untuk masyarakat juga akan meningkat (Dat et al. 2020). Selain itu populasi penduduk yang besar dengan kemajuan teknologi yang

pesat juga akan menyebabkan permintaan energi dalam bentuk listrik akan meningkat secara signifikan untuk menunjang aktifitas kehidupannya (Prastyabudi and Isa Hafidz 2020). Namun sumber energi terbesar saat ini sebagian besar diperoleh dari energi fosil seperti minyak bumi dan batubara, yang bersifat *non-renewable* sehingga akan habis jika dikonsumsi secara terus menerus dan dalam jumlah yang besar. Selain itu penggunaan bahan bakar fosil akan berdampak buruk terhadap lingkungan karena menghasilkan emisi gas karbon dan berkontribusi terhadap pemanasan global (Pambudi et al. 2023). Oleh karena itu dibutuhkan solusi yang tepat untuk mengatasinya, salah satu caranya yaitu mendapatkan potensi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang bersifat *renewable* dari material organik yaitu biomassa (Sertolli et al. 2022). Salah satu material yang mempunyai potensi untuk dijadikan bahan baku biomassa yaitu limbah kulit buah kakao yang jumlahnya sangat melimpah di Indonesia dan belum dimanfaatkan secara optimal (Prastika and Muzakhar 2023).

Berdasarkan data statistik perkebunan Indonesia, pada tahun 2020 produksi kakao (*Theobroma cacao L*) nasional mencapai 798.000 ton, dimana propinsi Kalimantan Timur menjadi salah satu sentral penghasil kakao (*Theobroma cacao L*) terbesar di Indonesia dengan luas lahan mencapai 68.830 hektar, dengan jumlah produksi 250.370 ton, dan daerah yang ikut berkontribusi cukup besar yaitu Kabupaten Berau. Melimpahnya produksi kakao ini tentunya akan berbanding lurus terhadap jumlah limbah kakao yang dihasilkan, karena 74% komposisi dari buah kakao adalah kulit buah kakao, 24% biji dan 2% adalah plasenta (Azah, Muchtarichie, and Iskandar 2020). Namun sampai saat ini pemanfaatan limbah kulit buah kakao masih belum dilakukan secara optimal, karena masih terbatas digunakan sebagai bahan tambahan makanan ternak, pupuk kompos, atau bahkan dianggap sebagai limbah yang dibuang di area perkebunan (Juradi, Tando, and Suwitra 2019). Hal ini tentu saja akan memberikan dampak yang buruk pada lingkungan karena dapat menyebabkan polusi udara akibat bau busuk yang ditimbulkan dan berpotensi membahayakan kesehatan. Padahal limbah yang berasal dari pertanian dan perkebunan dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku biomassa yang mempunyai nilai kalori sehingga dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi manusia seperti energi listrik, pemanas rumah tangga, bahan bakar kendaraan, dan untuk fasilitas industri (Konuk et al. 2021). Selain itu pemanfaatan limbah pertanian untuk bahan baku biomassa juga dapat menjadi solusi yang paling efektif mengatasi permasalahan dihadapi oleh seluruh negara di dunia yaitu krisis energi dan pemanasan global (Zhang et al. 2020) (Putera, Wati, and Poerbosisworo 2019). Secara umum biomassa didefinisikan sebagai bahan organik yang berasal dari makhluk hidup khususnya berasal dari tumbuh-tumbuhan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi bagi

manusia (Yan, Afrentiou, and Fokaides 2021)(Molino, Chianese, and Musmarra 2016). Biomassa yang terdapat di alam ini dapat berupa kayu, limbah tumbuh-tumbuhan, limbah pertanian, limbah perkebunan, serta limbah rumah tangga. Beberapa bahan baku biomassa dapat juga berasal dari limbah perkebunan dan pertanian, contohnya yaitu kulit buah kakao. Beberapa parameter utama dari karakteristik biomassa harus memenuhi standart yang sudah ditentukan yaitu kadar air, kadar abu, zat terbang, dan nilai kalori (Goudsmit et al. 2023)(Muzakir 2017). Hal ini bisa menjadi landasan penggunaan limbah kulit buah kakao untuk dijadikan sebagai sumber bahan baku biomassa.

Salah satu teknologi yang mampu mengkonversi energi biomassa yang berasal dari limbah pertanian dan perkebunan menjadi sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan adalah gasifikasi (Pertiwi et al. 2022)(Guo et al. 2014). Gasifikasi adalah proses termokimia yang menggunakan media udara untuk proses pembakaran untuk mengkonversi biomassa menjadi gas mampu bakar yang mempunyai nilai kalori melalui proses oksidasi tidak sempurna / parsial pada suhu yang tinggi (Suliono, Dionisius, and Sudarmanta 2020). Produk yang dihasilkan pada proses gasifikasi adalah gas mampu bakar yang biasa disebut *syngas* atau *synthetic gas*, yang terdiri dari senyawa gas hidrogen (H_2), senyawa gas karbon monoksida (CO), dan senyawa gas metana (CH_4) serta gas yang tidak mampu bakar berupa senyawa gas karbon dioksida (CO_2), Oksigen (O_2), nitrogen (N_2), dan senyawa hidrokarbon berat yaitu tar (Suparmin et al. 2024) (Basu 2023). Teknologi gasifikasi dengan memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar sangat efektif untuk menghasilkan *syngas* bernilai ekonomis tinggi bagi masyarakat (Mufid and Anis 2019). Secara umum proses gasifikasi terdiri dari beberapa tahapan yang meliputi : 1. Pengeringan (*drying*) yaitu proses penurunan kadar air yang terkandung dalam biomassa; 2. Pirolisis adalah proses penguraian bahan bakar biomassa secara thermal tanpa menggunakan udara atmosfer; 3. Oksidasi adalah proses pemasukan energi panas ke biomassa secara eksotermis; 4) Reduksi adalah proses yang melibatkan semua hasil produk reaksi dari tahapan sebelumnya yaitu oksidasi dan pirolisis yang menghasilkan produk reaksi berupa gas dan arang akan saling bereaksi secara kimia membentuk energi kalor pada *syngas* (Suliono, Dionisius, and Sudarmanta 2020).

Produk *syngas* yang didapatkan dari proses gasifikasi mengandung senyawa pengotor berupa tar, abu, asam sulfida (H_2S), asam klorida (HCl) dan gas yang tidak mempunyai nilai kalori yaitu CO , O_2 dan N_2 . Produk *syngas* dengan kadar tar yang tinggi apabila diimplementasikan pada motor bakar, akan berdampak pada penurunan kualitas *syngas* dan menyebabkan penurunan umur pemakaian mesin. Oleh karena itu dapat dilakukan beberapa metode untuk menurunkan kandungan tar pada *syngas* yaitu dengan cara metode

primer dan metode sekunder (Devi, Ptasiniski, and Janssen 2003). Metode primer adalah metode yang digunakan untuk menurunkan kandungan tar *syngas* dengan cara mengatur kondisi operasional proses gasifikasi seperti pengaturan suhu di zona oksidasi (*partial combustion zone*), pengaturan perbandingan jumlah aliran udara dan bahan bakar yang masuk ke reaktor serta melakukan modifikasi bentuk fisik reaktor. Sedangkan metode sekunder adalah metode yang digunakan untuk membersihkan kandungan tar *syngas* setelah keluar dari reaktor dengan komponen tambahan seperti *cyclone*, *water scrubber*, dan *dry filter* yang berisi arang.

Pada proses gasifikasi suhu di zona oksidasi merupakan salah satu parameter operasi yang sangat penting karena akan mempengaruhi kuantitas dan kualitas dari produksi *syngas* yang dihasilkan. Proses pengaturan suhu oksidasi dapat dilakukan dengan cara mengatur kecepatan *blower* sehingga jumlah udara yang dimasukkan ke reaktor dapat dikontrol. Penelitian tentang pengaruh nilai rasio jumlah udara dan jumlah bakar/*air fuel ratio* (*AFR*) pada proses gasifikasi dengan menggunakan bahan bakar dari limbah rumah tangga atau biasa disebut dengan *Municiple Solid Waste (MSW)* telah dilakukan, dan menunjukkan semakin tinggi nilai *AFR* maka kandungan CO akan meningkat yang menyebabkan nilai kandungan energi *LHV syngas* akan meningkat (Tiara et al. 2023). Sedangkan nilai *AFR* akan berpengaruh terhadap besarnya suhu oksidasi yang dicapai dan menentukan jenis pembakaran yang terjadi yaitu pembakaran parsial atau pembakaran sempurna. Suhu oksidasi yang ideal pada proses gasifikasi biomassa yaitu antara 900 °C - 1200 °C agar pembakaran yang terjadi berlangsung secara parsial dan mengurangi terbentuknya produk *non flamable* gas seperti CO₂ dan H₂O (Basu 2023).

Pada proses gasifikasi, bahan bakar biomassa yang terbuat dari kulit kakao dimasukkan kedalam *hopper* di sisi atas reaktor kemudian bergerak turun kebawah secara kontinyu dan perlahan sampai ke sisi atas *grade*. Media gasifikasi berupa udara akan dimasukkan kedalam reaktor melalui *nozzle* di sisi inlet yang berada di sekeliling reaktor zona oksidasi. Jenis reaktor yang sering digunakan pada gasifikasi biomassa yaitu *downdraft* dengan keunggulan produk *syngas* yang dihasilkan memiliki kandungan tar yang lebih rendah dibandingkan tipe reaktor yang lain. Pada reaktor jenis *downdraft* terdapat bagian yang dinamakan *throat* yang berbentuk seperti kerucut dengan pengecilan diameter di daerah zona reduksi. Konfigurasi pengecilan diameter ini dibuat dengan tujuan untuk memberikan tekanan pada material agar lebih lancar mengalir dari sisi atas menuju kebawah, sehingga semua hasil produk pada zona pirolisis melewati bagian pengerucutan tersebut, distribusi suhu disepanjang ketinggian reaktor lebih merata, serta memaksimalkan proses pemecahan tar agar terurai dan retak (*cracked*).

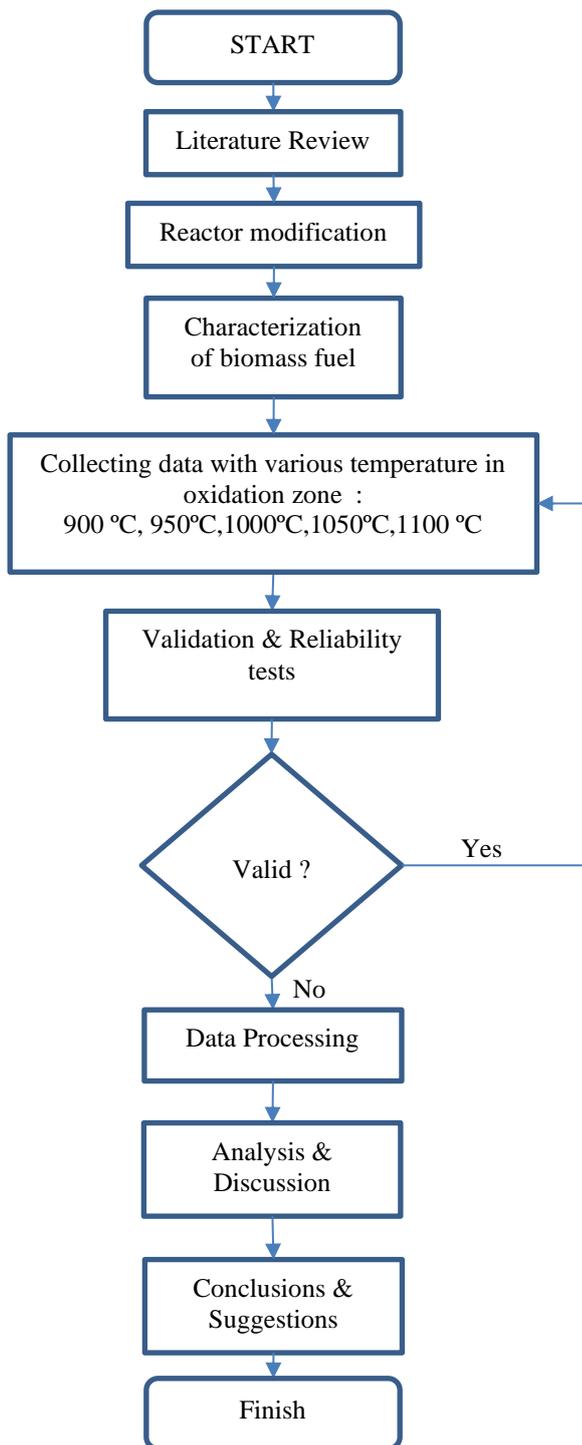
Pengujian *ultimate* pada biomassa kulit buah kakao sangat diperlukan untuk mengetahui kelayakan dan kualitas bahan baku yang akan digunakan, yaitu komposisi unsur penyusun dasar dari bahan baku yang meliputi karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), oksigen (O), sulfur (S) dengan presentase total berat adalah 100%. Sedangkan analisa *proximate* dilakukan untuk mengetahui komposisi biomassa secara menyeluruh yaitu kandungan *mouisture*, *volatile matter*, *fixed* karbon, *Low Heating Value (LHV)*, dan debu. Kandungan *mouisture* menunjukkan presentase kadar air dari biomassa, *volatile matter* adalah kandungan gas di dalam biomassa baik yang terkondensasi ataupun tidak, *fixed* karbon menunjukkan besarnya karbon terikat dari biomassa, sedangkan nilai *LHV* menunjukkan besarnya kandungan energi panas yang dikandung oleh biomassa per satuan volume. Hasil pengujian *ultimate* dan *proximate* dapat digunakan untuk memberikan gambaran tentang kelayakan dan kualitas dari biomassa yang akan digunakan.

2. RUANG LINGKUP

Ruang lingkup penelitian ini difokuskan untuk menganalisa pengaruh variasi temperatur zona oksidasi terhadap parameter utama kinerja reaktor gasifikasi yang meliputi distribusi suhu pada setiap zona gasifikasi, komposisi *syngas* yang diproduksi, serta nilai kandungan energi panas (*LHV*). Reaktor gasifikasi menggunakan tipe *downdraft* yang terbuat dari material baja karbon tahan panas dengan diameter 35 cm dan tinggi 250 cm serta dilengkapi dengan beberapa komponen sekunder untuk menurunkan kadar tar dari *syngas*. Produk dari proses gasifikasi yang diinginkan yaitu *syngas* dengan kualitas baik dan memiliki kadar tar yang rendah sehingga dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan industri untuk menggantikan penggunaan BBM dan gas alam seperti LPG yang saat ini semakin langka dan harganya relatif mahal. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah memanfaatkan limbah kulit buah kakao yang berasal dari kelompok petani yang tersebar di beberapa wilayah Kabupaten Berau.

3. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental di *workshop* Politeknik Sinarmas Berau Coal selama 6 bulan dari bulan maret-september 2024. *Flow* proses penelitian mengikuti diagram alir yang terdapat pada Gambar 1.

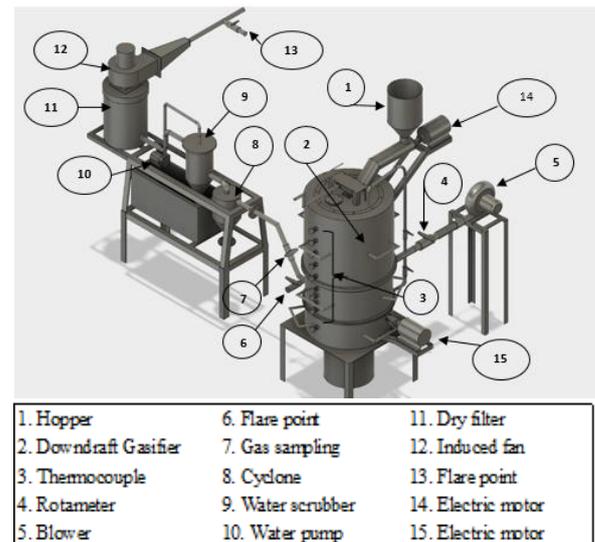


Gambar 1. Diagram alir penelitian
 Figure 1. Research flow diagram

Pada diagram alir penelitian terlihat tahapan awal penelitian yaitu melakukan kajian dan tinjauan pustaka terhadap sumber-sumber referensi yang update dan relevan. Selanjutnya memodifikasi peralatan penelitian untuk meningkatkan unjuk kerja reaktor dalam menghasilkan *syngas* yang berkualitas. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan pengaduk di dalam

reaktor dan penyapu abu diatas *grate*. Sebelum proses pengambilan data dilakukan uji *ultimate* dan *proximate* pada limbah kulit kakao untuk mengetahui kualitas dan karakteristik dari bahan bakar yang digunakan. Pengambilan kebutuhan data yaitu distribusi suhu diseluruh zona gasifikasi dan hasil *syngas* yang diproduksi selama proses gasifikasi dilakukan pada variasi suhu zona oksidasi yang berbeda yaitu pada suhu 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C. Untuk memvalidasi data yang diperoleh maka dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 3 kali dan diambil nilai rata-rata pada kondisi variasi suhu zona oksidasi yang sudah ditetapkan. Hasil produksi *syngas* dilakukan uji komposisi dengan *Gas Chromatograph*, sedangkan nilai *LHV* menggunakan alat *bomb calorimeter* untuk dilakukan analisa lebih mendalam.

Peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor jenis *downdraft*, *thermocouple*, *rotameter*, *blower*, *water scrubber*, *induced fan*, *water pump*, *dry filter*, *flare point*, dan beberapa *valve* untuk membuka dan menutup saluran udara dan *syngas*. Skema peralatan penelitian secara lengkap terlihat pada Gambar 2.



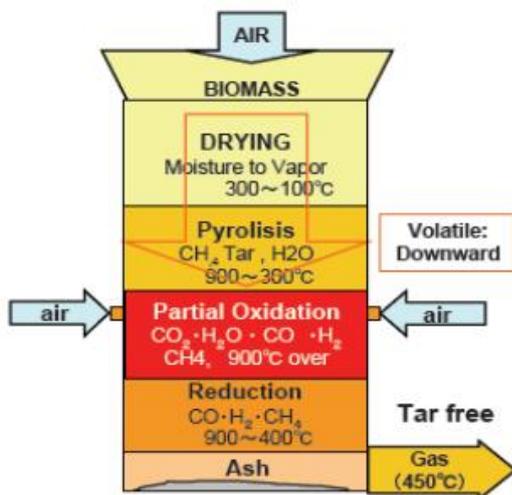
Gambar 2. Skema peralatan penelitian
 Figure 2. Research equipment scheme

Proses memasukkan biomassa kulit buah kakao kedalam reaktor yaitu melalui sisi *hopper* bagian atas reaktor dilakukan secara terus menerus dan kontinyu sampai proses pengambilan data selesai. Kapasitas maksimum laju pemasukan bahan bakar biomassa pada reaktor adalah 4 kg/jam. Untuk mengukur dan memonitor perubahan suhu di sepanjang ketinggian dinding reaktor maka dipasang 7 unit *thermocouple* tipe K yang dihubungkan dengan *controller* yang memakai *hardware arduino*. Saluran masuk udara ke dalam reaktor terletak tepat di daerah zona oksidasi terbuat dari pipa besi dan dipasang *rotameter* dengan katub untuk mengatur besarnya laju aliran udara ke reaktor. Di bagian dalam

reaktor dilengkapi dengan pengaduk bahan bakar biomassa yang terbuat dari baja karbon tinggi, yang berfungsi untuk membantu memperlancar aliran biomassa dari atas ke sisi bawah serta meningkatkan pemerataan suhu secara homogen keseluruh sisi biomassa agar pembakaran yang terjadi sesuai dengan yang diharapkan. Di sisi bawah zona reduksi terdapat komponen *grate* yang dilengkapi dengan lobang-lobang dan mekanisme penyapuan untuk memperlancar proses pengeluaran abu ke sisi bawahnya yaitu tempat penampungan abu yang biasa dinamakan dengan *ash box*. Di sisi luar reaktor terdapat beberapa komponen sekunder untuk memastikan bahwa proses gasifikasi dapat berjalan maksimal sehingga menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang baik dan kandungan tar yang rendah. Komponen sekunder tersebut antara lain : *flare point* yaitu titik pembakaran *syngas*, *cyclone* yang berfungsi sebagai penyaring material pengotor *syngas* seperti debu dan partikel-partikel kecil lainnya, *water scrubber* yang dilengkapi pompa air untuk mensirkulasikan air pembersih yang berfungsi untuk menghilangkan kadar air dan menurunkan kandungan tar dari *syngas*, serta komponen terakhir yaitu *dry filter* berisi arang aktif yang berfungsi sebagai penyerap air dan menurunkan kandungan tar. Setelah melewati beberapa proses di komponen sekunder disisi luar reaktor gasifikasi tersebut diharapkan produk *syngas* yang dihasilkan mempunyai kualitas yang baik yaitu *syngas* dengan kadar tar yang rendah dan layak untuk dimanfaatkan oleh masyarakat dan industri.

3.1 Reaksi Kimia Proses Gasifikasi

Secara umum tahapan reaksi kimia pada proses gasifikasi yang menggunakan reaktor tipe *downdraft* meliputi : proses pengeringan (*drying*), proses pirolisis, proses oksidasi parsial, dan proses reduksi. Keseluruhan proses gasifikasi beserta reaksi kimia yang terjadi didalam reaktor tipe *downdraft* dapat terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Reaksi kimia gasifikasi tipe *downdraft*
Figure 3. Chemical reaction in *downdraft* gasifier

Menurut (Basu 2023) persamaan reaksi kimia secara umum di setiap tahapan proses gasifikasi di masing-masing zona adalah sebagai berikut :

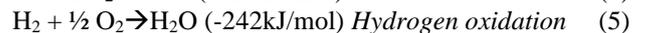
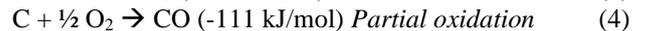
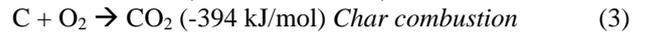
Zona Pengeringan (*Drying*)



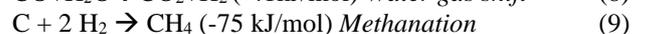
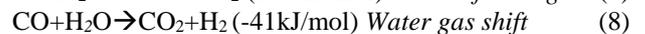
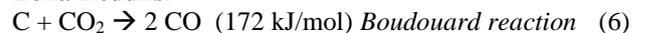
Zona Pirolisis



Zona Oksidasi (*Partial oxidation*)



Zona Reduksi



4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian *Ultimate* dan *Proximate*

Pengujian *ultimate* biomassa kulit buah kakao telah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kandungan unsur karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), oksigen (O), sulfur (S), serta nilai kandungan kalor (LHV) bahan bakar. Sedangkan pengujian *proximate* dilakukan untuk mengetahui kandungan *moisture*, *ash content*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Hasil pengujian *ultimate* dan *proximate* kulit buah kakao terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji *ultimate* dan *proximate* biomassa kulit buah kakao

Table 1. Result of *ultimate* and *proximate* tests for cocoa pod husk biomass

Parameter	Value
Ultimate Test (% wt)	
Carbon (C)	42.83
Hydrogen (H)	7.32
Oxygen (O)	36.11
Nitrogen (N)	0.65
Sulfur (S)	0.16
LHV (kJ / kg)	4582.64
Proximate Test (% wt)	
Moisture content	10.12
Volatile Matter	24.32
Fixed carbon	52.11
Ash content	13.45

4.2 Distribusi Suhu di Dinding Reaktor Gasifikasi

Pada proses gasifikasi suhu merupakan salah satu variabel operasi yang sangat penting untuk dikontrol. Semakin tinggi suhu operasional maka kualitas dan kuantitas *syngas* yang dihasilkan akan meningkat. Data pengujian gasifikasi berbahan bakar kulit buah kakao didapatkan dengan melakukan variasi suhu di zona

oksidasi yaitu 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C. Distribusi suhu di dinding reaktor diukur dengan menggunakan 7 buah *thermocouple* tipe-K yang dipasang di zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi, dan zona reduksi. Data yang terukur oleh *thermocouple* disimpan dan diolah oleh data logger DC100, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Distribusi suhu seluruh zona gasifikasi
 Table 2. Temperature distribution in all gasification zone

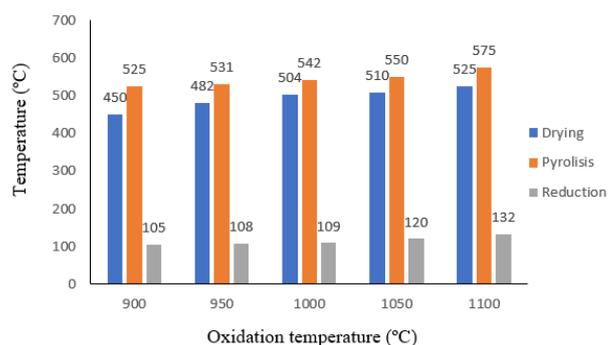
Height (cm)	Zone	Temperature Distribution (°C)				
25	Reduction	450	482	505	510	520
38	Oxidation	900	950	1000	1050	1100
50	Pyrolysis	525	531	542	550	575
63	Pyrolysis	375	397	412	420	445
80	Drying	160	176	187	199	205
90	Drying	142	145	152	158	161
100	Drying	105	108	109	120	132

Dari data yang diperoleh terlihat bahwa peningkatan suhu pada zona oksidasi yaitu 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan suhu pada seluruh zona lainnya yaitu zona reduksi, zona pirolisis dan zona *drying*. Pada zona reduksi (ketinggian 25 cm) suhu reaktor naik dari 450°C menjadi 520°C, zona pirolisis (ketinggian 63 cm) suhu naik dari 375°C menjadi 445°C, dan pada zona *drying* (ketinggian 100 cm) suhu naik dari 105°C menjadi 132°C. Hal ini disebabkan jumlah energi panas yang ditransferkan (*heat transfer*) ke zona lain semakin besar. Peningkatan nilai *heat transfer* ini akan berpengaruh terhadap reaksi kimia yang terjadi di masing-masing zona dan jenis pembakaran yang terjadi, sehingga akan berkontribusi positif terhadap kualitas *syngas* yang dihasilkan.

4.3 Pengaruh Variasi Suhu Zona Oksidasi Terhadap perubahan di Zona *Drying*, Zona Pirolisis, dan Zona Reduksi

Variasi suhu di zona oksidasi diperoleh dengan cara memvariasikan jumlah udara yang dimasukkan ke dalam reaktor. Pada Gambar 4 terlihat grafik pengaruh variasi suhu di zona oksidasi parsial terhadap distribusi suhu di seluruh zona yaitu zona *drying*, zona pirolisis, dan zona reduksi. Dari grafik tersebut terlihat bahwa hubungan peningkatan suhu di zona oksidasi berbanding lurus terhadap distribusi peningkatan suhu di seluruh zona gasifikasi lainnya. Semakin tinggi suhu oksidasi yang dicapai maka suhu di seluruh zona gasifikasi yang lainnya juga akan meningkat. Dari variasi suhu zona oksidasi yang diberikan, terlihat bahwa suhu oksidasi 1100 °C yang terletak pada ketinggian dinding 38 cm diatas titik *grate*, memberikan pengaruh yang paling optimum terhadap peningkatan suhu semua zona lainnya yaitu suhu zona

drying (ketinggian 80 cm) adalah 205 °C, zona pirolisis (ketinggian 50 cm) adalah 575 °C, dan zona reduksi (ketinggian 25 cm) adalah 520°C. Sebaliknya pada suhu oksidasi 900 °C memberikan pengaruh peningkatan suhu yang paling minimum terhadap zona gasifikasi lainnya yaitu suhu zona *drying* (ketinggian 80 cm) adalah 160°C, zona pirolisis (ketinggian 50 cm) adalah 525°C, dan zona reduksi (ketinggian 25 cm) adalah 450°C. Hal ini disebabkan semakin besar suhu zona oksidasi yang dicapai, maka energi panas yang ditransferkan ke zona yang lain juga semakin besar sehingga suhu yang dicapai pun akan meningkat.



Gambar 4. Grafik suhu di zona oksidasi terhadap distribusi suhu dinding reaktor

Figure 4. Graph of oxidation temperature Against temperature distribution in the reactor wall

4.4 Pengaruh Variasi Suhu Zona Oksidasi Terhadap Komposisi *Syngas*

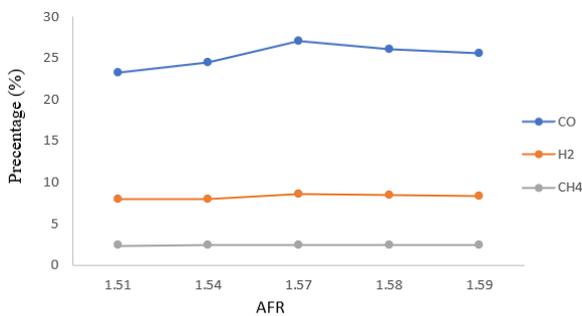
Suhu di zona oksidasi sangat mempengaruhi kualitas *syngas* dari proses gasifikasi. Oleh karena itu sangat penting untuk menentukan besarnya campuran udara dan bahan bakar (*air fuel ratio/AFR*) yang tepat untuk dimasukkan kedalam reaktor agar tercapai suhu oksidasi yang diinginkan. Tabel 3 menunjukkan hasil komposisi kimia *syngas* pada variasi suhu zona oksidasi yang berbeda yaitu 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C.

Tabel 3. Komposisi *syngas* pada variasi suhu oksidasi
 Table 3. The *syngas* composition on variation oxidation temperature

Oxidation Temperature (°C)	AFR	LHV (kJ/m ³)	Syngas Composition (% volume)		
			CO	H ₂	CH ₄
900	1,51	4642	23,24	7,93	2,37
950	1,54	4827	24,54	8,02	2,40
1000	1,57	5206	27,08	8,53	2,41
1050	1,58	5084	26,13	8,48	2,42
1100	1,59	5009	25,65	8,35	2,42

Besarnya suhu pada zona oksidasi ini akan menentukan jenis pembakaran yang terjadi pada proses gasifikasi. Proses pembakaran yang diinginkan pada

proses gasifikasi adalah berlangsung secara parsial bukan pembakaran secara sempurna (stokiometri) karena akan menghasilkan senyawa CO₂ tinggi yang tidak mempunyai nilai energi panas dan menurunkan kadar LHV *syngas*. Variasi suhu zona oksidasi didapatkan dengan cara mengatur jumlah udara yang dihembuskan oleh *blower* kedalam reaktor dengan nilai rasio *AFR* yang didapatkan secara berurutan yaitu : 1,51 ; 1,54 ; 1,57 ; 1,58 dan 1,59. Pengaruh nilai *AFR* terhadap kualitas *syngas* pada proses gasifikasi berbahan bakar limbah kulit kakao dapat dilihat pada Gambar 5. Kandungan *output syngas* yang didapatkan dari proses gasifikasi yaitu terdiri dari *flamable gas* yaitu CO, H₂, dan CH₄ yang mempunyai nilai energi panas.



Gambar 5. Grafik AFR terhadap komposisi syngas
Figure 5. Graph of AFR values against syngas composition

Dari Tabel 3 dan Gambar 5 terlihat bahwa nilai optimum kandungan *flamable syngas* yaitu CO, H₂ dan CH₄ didapat pada suhu zona oksidasi 1000 °C dengan nilai *AFR* 1,57. Besarnya presentase yaitu : CO 27,08% ; H₂ 8,53% ; CH₄ 2,41%, dengan nilai energi panas LHV yang dikandung sebesar 5206 kJ/m³. Sedangkan nilai minimum didapatkan pada suhu zona oksidasi 900°C dengan nilai *AFR* 1,51. Kandungan presentase *flamable syngas* yang didapat yaitu: CO 23,24% ; H₂ 7,93% ; CH₄ 2,37%, dan nilai LHV 4642 kJ/m³. Dari data tersebut terlihat bahwa peningkatan suhu zona oksidasi akan meningkatkan presentase *flamable syngas* yang dihasilkan yaitu CO, H₂ dan CH₄ yang menyebabkan peningkatan nilai LHV dari *syngas* pada proses gasifikasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang sudah dilakukan oleh (Kirsanovs et al. 2017) dan (Christy et al. 2020) yaitu peningkatan nilai *AFR* pada proses gasifikasi yang didapat dengan cara memperbesar laju aliran masa udara yang dimasukkan kedalam reaktor di zona oksidasi akan meningkatkan presentase senyawa CO pada kandungan *syngas*. Hal ini sangat sesuai dengan persamaan reaksi pada zona oksidasi dan zona reduksi yang sudah diberikan yaitu :

Zona Oksidasi



Zona Reduksi



Dari persamaan yang diberikan diatas, maka terlihat bahwa pada reaksi *char combustion* semakin tinggi nilai O₂ yang didapatkan dengan meningkatkan nilai *AFR*, maka produk senyawa CO₂ yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sedangkan pada reaksi *boudouard* di zona reduksi, produk senyawa CO₂ hasil dari reaksi *char combustion* akan bereaksi dengan unsur karbon membentuk senyawa CO yang mempunyai nilai LHV yang tinggi. Selain itu pada reaksi *partial oxidation* terlihat peningkatan nilai O₂ juga akan menyebabkan peningkatan produksi senyawa CO. Oleh karena itu peningkatan suhu zona oksidasi yang didapatkan dengan cara meningkatkan jumlah udara (O₂) kedalam reaktor akan menyebabkan peningkatan kandungan CO pada *syngas*. Kandungan senyawa CO pada *syngas* yang tinggi akan meningkatkan nilai energi panas LHV yang terkandung karena CO adalah senyawa gas yang bersifat mampu bakar (*flamable gas*).

5. KESIMPULAN

Peningkatan suhu di zona oksidasi parsial pada gasifikasi berbahan bakar limbah kulit kakao memberikan pengaruh yang positif terhadap beberapa parameter unjuk kerja reaktor jenis *downdraft* yang meliputi distribusi suhu dinding reaktor, kualitas *syngas*, dan nilai kandungan energi panas LHV. Pada aspek distribusi suhu sepanjang reaktor, peningkatan suhu zona oksidasi pada interval 900 °C-1100 °C menyebabkan terjadinya peningkatan suhu di zona *drying* sebesar rata-rata 30,3 °C yaitu dari 105 °C, 142 °C, 160 °C menjadi 132 °C, 161 °C, dan 205 °C. Peningkatan di zona pirolisis yaitu rata-rata sebesar 60 °C dari 375 °C, 525 °C menjadi 445 °C, 575 °C. Sedangkan peningkatan di zona reduksi sebesar rata-rata 70 °C yaitu dari 450 °C menjadi 520 °C. Sedangkan untuk kualitas *syngas* yang paling optimum didapat pada suhu zona oksidasi 1000 °C yaitu CO 27,08% ; H₂ 8,53% ; CH₄ 2,41%, dengan nilai kandungan energi panas LHV sebesar 5206 kJ/m³.

6. SARAN

Penelitian terkait pengembangan gasifikasi tipe *downdraft* dengan memanfaatkan limbah biomassa khususnya kulit buah kakao masih perlu dikembangkan lebih lanjut agar dapat menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang baik dengan kadar tar yang rendah, sehingga dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan industri secara lebih luas untuk menggantikan penggunaan BBM dan gas alam LPG yang semakin langka dan mahal. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk peningkatan kualitas *syngas* adalah dengan penambahan pengaduk di dalam reaktor. Hal ini akan memberikan manfaat bahan bakar yang berproses di dalam reaktor akan akan tercampur sempurna dan lebih homogen sehingga mempengaruhi

distribusi temperatur di setiap zona gasifikasi. Selain itu perlu ditambahkan *port sampling* di daerah zona pirolisis untuk melakukan analisa mendalam tentang hasil produk reaksi kimia di zona tersebut setelah dilakukan pemasukan udara kedalam reaktor. Selanjutnya perlu dilakukan modifikasi dengan penambahan penyapu abu di atas *grate*, untuk memaksimalkan laju pengeluaran abu hasil dari proses gasifikasi. Abu yang terlalu banyak menumpuk diatas *grate* akan berpotensi menurunkan kualitas dan kuantitas *syngas* yang dihasilkan pada proses gasifikasi.

7. REFERENSI

- Azah, Nida Isti, Resmi Muchtarichie, and Yoppi Iskandar. 2020. "Standardization Parameters for Cocoa Pods (*Theobroma Cacao L.*)". *Jurnal Ilmiah Farmasi* 16(2): 182–95. doi:10.20885/jif.vol16.iss2.art9.
- Basu, Prabir. 2023. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 4th Edition*. doi:10.1016/C2011-0-07564-6.
- Christy, John Victor, Abdel Hamid Ismail Mourad, Amir Hussain Idrisi, Dinu Thomas Thekkuden, and Nizamudeen Cherupurakal. 2020. "Experimental Investigation of Syngas Production through Gasification of Biomass Char in a Fluidized Bed Reactor." 2020 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2020* doi:10.1109/ASET48392.2020.9118359.
- Dat, Nguyen Duy, Nguyen Hoang, Mai Thanh Huyen, Dinh Tran Ngoc Huy, and Luong Minh Lan. 2020. "Energy Consumption and Economic Growth in Indonesia." *International Journal of Energy Economics and Policy* 10(5): 601–7. doi:10.32479/ijee.10243.
- Devi, Lopamudra, Krzysztof J. Ptasinski, and Frans J.J.G. Janssen. 2003. "A Review of the Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes." *Biomass and Bioenergy* 24(2): 125–40. doi:10.1016/S0961-9534(02)00102-2.
- Goudsmit, Eva, Danaë M.A. Rozendaal, Ambra Tosto, and Maja Slingerland. 2023. "Effects of Fertilizer Application on Cacao Pod Development, Pod Nutrient Content and Yield." *Scientia Horticulturae* 313(January). doi:10.1016/j.scienta.2023.111869.
- Guo, Feiqiang, Yuping Dong, Lei Dong, and Chenlong Guo. 2014. "Effect of Design and Operating Parameters on the Gasification Process of Biomass in a Downdraft Fixed Bed: An Experimental Study." *International Journal of Hydrogen Energy* 39(11): 5625–33. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.01.130.
- Juradi, Muhamad Afif, Edi Tando, and Ketut Suwitra. 2019. "Inovasi Teknologi Pemanfaatan Limbah Kulit Buah Kakao (*Theobroma Cacao L.*) Sebagai Pupuk Organik Ramah Lingkungan." *AGRORADIX: Jurnal Ilmu Pertanian* 2(2): 9–17. doi:10.52166/agroteknologi.v2i2.1586.
- Kirsanovs, Vladimirs, Dagnija Blumberga, Ivars Veidenbergs, Claudio Rochas, Edgars Vigants, and Girts Vigants. 2017. "Experimental Investigation of Downdraft Gasifier at Various Conditions." *Energy Procedia* 128:332–38. doi:10.1016/j.egypro.2017.08.321.
- Konuk, Filiz, Feyyaz Zeren, Sema Akpınar, and Şule Yıldız. 2021. "Biomass Energy Consumption and Economic Growth: Further Evidence from NEXT-11 Countries." *Energy Reports* 7: 4825–32. doi:10.1016/j.egypr.2021.07.070.
- Molino, Antonio, Simeone Chianese, and Dino Musmarra. 2016. "Biomass Gasification Technology: The State of the Art Overview." *Journal of Energy Chemistry* 25(1):10–25. doi:10.1016/j.jechem.2015.11.005.
- Mufid, Faishal, and Samsudin Anis. 2019. "Pengaruh Jenis Dan Ukuran Biomassa Terhadap Proses Gasifikasi Menggunakan Downdraft Gasifier." *Jurnal Rekayasa Mesin* 10(3): 217–26. doi:10.21776/ub.jrm.2019.010.03.2.
- Muzakir, M T. 2017. "Pemanfaatan Kulit Buah Kakao Menjadi Briket Arang Menggunakan Kanji Sebagai Perekat." *Serambi Engineering II*(3): 124–29.
- Pambudi, Nugroho Agung, Ridho Alfian Firdaus, Reza Rizkiana, Desita Kamila Ulfa, Muntasy Syahrul Salsabila, Suharno, and Sukatiman. 2023. "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development." *Sustainability (Switzerland)* 15(3). doi:10.3390/su15032342.
- Pertiwi, Sarah, Yohanes Bobby, Marcellino Lorenzo, Hafif Dafiqurrohman, and Adi Surjosatyo. 2022. "Mobile Rice Husk Gasifier Performance and Techno-Economic Analysis as Micro Scale Power Generation: Modeling and Experiment." *Journal of Engineering and Technological Sciences* 54(6). doi:10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.8.
- Prastika, A, and S S A Muzakhar. 2023. "Analisis Pemanfaatan Limbah Biomassa Sebagai Basis Pengembangan Energi Terbarukan Di Kabupaten Jember." *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*. doi:10.32528/jp.v8i1.472.
- Prastyabudi, Wahyu Andy, and Isa Hafidz. 2020. "Energy Consumption Data Analysis: Indonesia Perspective." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication* 1(1): 1–10. doi:10.52435/complete.v1i1.47.
- Putera, Prakoso Bhairawa, Hermawati Wati, and Ishelina Rosaira Poerbosisworo. 2019. "Kecenderungan Perkembangan Teknologi Gasifikasi Biomassa : Studi Perbandingan Di Beberapa Negara."



Sustainability (Switzerland) 11(1): 1–14.

- Sertolli, Ardit, Zoltán Gabnai, Péter Lengyel, and Attila Bai. 2022. “Biomass Potential and Utilization in Worldwide Research Trends—A Bibliometric Analysis.” *Sustainability (Switzerland)* 14(9). doi:10.3390/su14095515.
- Suliono, Suliono, Felix Dionisius, and Bambang Sudarmanta. 2020. “Pengaruh Kecepatan Aliran Udara Dengan Pengaturan Dimmer Pada Tekanan Udara Masuk Pada Proses Gasifikasi Sekam Padi Terhadap Pembentukan Flamable Gas.” *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)* 6(1): 62. doi:10.31884/jtt.v6i1.237.
- Suparmin, Prayudi, Nanik Purwanti, Leopold Oscar Nelwan, and Sutrisno S. Mardjan. 2024. “Biomass Gasification Modelling Development: A Review.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1386(1). doi:10.1088/1755-1315/1386/1/012018.
- Tiara, Miftahul Djana, Rizka Mayasari, Hasrul Anwar, Muhammad Haviz, and 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. doi:10.31851/redoks.v8i1.9303.
- Yan, Moiseev, Nicholas Afxentiou, and Paris A. Fokaidis. 2021. “The State of the Art Overview of the Biomass Gasification Technology.” *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 8(4): 282–95. doi:10.1007/s40518-021-00196-2.
- Zhang, Yuming, Lifeng Wan, Juntao Guan, Qing’An Xiong, Shu Zhang, and Xin Jin. 2020. “A Review on Biomass Gasification: Effect of Main Parameters on Char Generation and Reaction.” *Energy and Fuels* 34(11):13438–55. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c02900.