



Pemanfaatan Limbah Kulit Kopi Sebagai Energi dengan Menggunakan Teknologi Gasifikasi *Downdraft Three-Stage Gasifier*

Sigit Mujiarto^{1*}, Paryanto², Aries Susanty³

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

²Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

³Departemen Teknik Industri Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*)Corresponding author: sigmujiarto@untidar.ac.id

(Received: August 1, 2025; Accepted: September 29, 2025)

Abstract

Utilization of Coffee Husk Waste as Energy Using Downdraft Three-Stage Gasification Technology. Indonesia requires a large amount of energy due to the current population and industrial growth. The large-scale use of fossil fuels results in emissions in the environment and global warming, so new energy sources from environmentally friendly alternative energy are needed to reduce the high emissions that occur. Coffee husk waste in Indonesia also increases every year, with increasing production every year becoming the 4th largest coffee producer in the world. The objectives of this study are (i) to overcome energy problems and (ii) to overcome coffee husk waste by converting coffee husk waste into energy using downdraft gasification technology using three levels of air passage. The coffee husk that has been dried with a size of 3-5 mm is inserted into the gasifier, then the gasifier is started until it reaches the desired temperature and the syngas comes out. The variations used are variations in the air fuel ratio (AFR) of 1.63; 1.65; 1.67; 1.7. The results showed that the highest LHV of syngas was in the AFR 1.65 sample with a value of 130,565 KJ/kg. These results can be used as a database for the development of the use of coffee skin waste as alternative energy in the future.

Keywords: energy, coffee skin, gasification, downdraft, three-stage passage

Abstrak

Indonesia memerlukan energi yang besar seiring pertumbuhan penduduk dan industri saat ini. Energi fosil yang digunakan secara besar-besaran mengakibatkan terjadinya emisi di lingkungan dan pemanasan global, sehingga diperlukan sumber energi yang baru dari energi alternatif yang ramah lingkungan untuk mengurangi tingginya emisi yang terjadi. Limbah kulit kopi di Indonesia juga mengalami peningkatan setiap tahunnya, dengan meningkatnya produksi setiap tahunnya menjadi produsen kopi terbesar ke-4 dunia. Tujuan dari penelitian ini adalah (i) mengatasi permasalahan energi dan (ii) mengatasi limbah kulit kopi dengan menjadikan limbah kulit kopi menjadi energi menggunakan teknologi gasifikasi *downdraft* menggunakan tiga tingkat laluan udara. Kulit kopi mula-mula yang sudah dikeringkan dengan ukuran 3-5 mm dimasukkan ke dalam *gasifier*, kemudian *gasifier* mulai dinyalakan sampai tercapai temperatur yang diinginkan dan keluar *syngas*-nya. Variasi yang dipakai adalah variasi *air fuel ratio* (AFR) 1,63; 1,65; 1,67; 1,7. Hasil penelitian didapatkan bahwa LHV *syngas* tertinggi pada sampel AFR 1,65 dengan nilai 130,565 KJ/kg. Hasil ini bisa dipakai sebagai pangkalan data untuk pengembangan pemanfaatan limbah kulit kopi menjadi energi alternatif yang akan datang.

Kata kunci: energi, kulit kopi, gasifikasi, downdraft, tiga tingkat laluan

How to Cite This Article: Mujiarto, S., Paryanto, P., & Susanty, A. (2025). Pemanfaatan Limbah Kulit Kopi Sebagai Energi dengan Menggunakan Teknologi Gasifikasi Downdraft Three-Stage Gasifier. *JPII*, 3(3), 161-166. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2025.26870>

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan konsumsi energi terbesar di Asia Tenggara dengan konsumsi energi final Indonesia tahun 2016 masih didominasi oleh BBM sebesar 47%, berdasarkan BPTT *Outlook Energi Indonesia 2018* (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2018). Penggunaan bahan bakar fosil yang meningkat mengakibatkan kenaikan emisi gas rumah kaca sebagai akibatnya iklim tidak stabil dan meningkatnya *global warming* yang menyebabkan kenaikan permukaan air laut (Setyono & Kiono, 2021), sehingga perlu penggunaan energi alternatif yang ramah lingkungan. Energi alternatif yang dapat digunakan adalah dengan memanfaatkan hasil alam atau limbah yang mengandung biomassa. Salah satu limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif adalah kulit kopi.

Kopi merupakan salah satu komoditas Indonesia yang sangat diminati di seluruh dunia, baik karena kepuasan yang dirasakan oleh para penikmatnya maupun karena nilai ekonomis yang signifikan bagi negara-negara penghasil dan pengekspor biji kopi. Total produksi Indonesia mencapai 660.000 ton pada tahun 2019-2020 dan menempati urutan keempat sebagai negara penghasil kopi terbesar di dunia (Fhisabillila, 2021). Data statistik menunjukkan produksi kopi di Indonesia pada tahun 2022 mencapai 774,96 ribu ton/tahun (Badan Pusat Statistik, 2023). Limbah kulit kopi yang dihasilkan sekitar 20% sehingga limbah yang dihasilkan berupa kulit kopi pada tahun 2022 mencapai 154,992 ton. Cangkang kulit kopi mempunyai kandungan lignin lebih tinggi dibandingkan selulosa, yaitu 52,59% dan nilai kalor yang tinggi yaitu 4285 kkal/kg (Lestari & Priambodo, 2020). Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai biomassa juga dapat mendukung petani pada industri kopi sehingga dapat terbentuk *close loop production system*.

Pengolahan limbah biomassa kulit kopi untuk menghasilkan energi alternatif berupa *syngas* dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi gasifikasi yang dapat digunakan untuk mengonversi biomassa (limbah kulit kopi) menjadi energi alternatif tanpa menghasilkan emisi (Arena, 2012). Proses gasifikasi merupakan teknologi yang dapat memproses konversi bahan baku padat atau cair menjadi bahan bakar gas secara termokimia (Basu, 2010). Proses gasifikasi terdiri dari beberapa tahapan proses yang berurutan, yaitu tahap *drying*, pirolisis, oksidasi parsial dan reduksi. Proses gasifikasi juga membutuhkan media seperti udara, oksigen, campuran oksigen dan uap air (Hayday, 2016). Hasil pada proses gasifikasi adalah berupa *flammable gas*

atau yang biasa disebut *synthetic gas (syngas)* terdiri dari *combustible syngas* (CO, H₂ dan CH₄) dan *non combustible gas* (CO₂, N₂ dan O₂ sisa). *Syngas* yang dihasilkan dengan proses gasifikasi dapat diaplikasikan ke motor pembakaran dalam.

Reaktor gasifikasi memiliki beberapa tipe berdasarkan aliran udaranya, yaitu: *updraft gasifier*, *downdraft gasifier* dan *crossdraft gasifier*. Penelitian ini memakai tipe *downdraft gasifier* karena memiliki kelebihan yaitu tingginya tingkat konversi karbon, produksi tar rendah dan memiliki konstruksi sederhana dibandingkan dengan tipe lainnya (Susastriawan et al., 2017). Penelitian *downdraft gasifier* telah dilakukan pengembangan mulai dari studi kelayakan bahan baku (Belgiorno et al., 2003), menganalisis energi yang dihasilkan (Jaojaruek et al., 2011), menganalisis model ekuilibrium termodinamika (Luz et al., 2015) juga menganalisis teknno-ekonomi energi gasifikasi untuk pembangkitan listrik (Doherty et al., 2013). Hasil penelitian Salet et al. (2019) menyatakan bahwa *gasifier* dengan udara masukan melalui laluan 3 tingkat (*multi-stage*) mampu menghasilkan *syngas* yang optimum sebagai bahan bakar *internal combustion engine (ICE)*.

Penelitian mengenai pengaruh variasi *air fuel ratio* (AFR) pada tempurung kelapa telah dilakukan. Nilai AFR yang meningkat dapat menyebabkan terjadinya penurunan kandungan konsentrasi *syngas* pada gas mudah bakar (*combustible gas*), menurunkan nilai LHV *syngas*, menurunkan komposisi *flammable gas* yang dihasilkan (Najib & Darsopuspito, 2012).

Penelitian ini mempunyai 2 tujuan, yaitu menjadi solusi permasalahan penanganan limbah kulit kopi yang dimanfaatkan sebagai bahan baku gasifikasi dan menjadi sumber energi alternatif atau energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

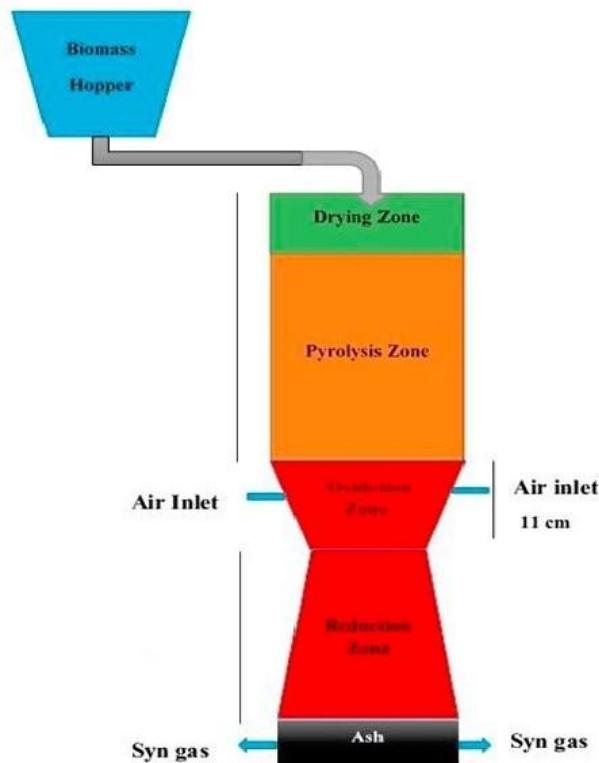
Bahan dan alat

Bahan baku yang digunakan sebagai bahan uji yaitu limbah kulit kopi yang dikumpulkan dari hasil penggilingan kopi kering menggunakan mesin *huller* berupa *flakes* atau serpihan-serpihan kecil penggilingan kulit kopi kering dengan ukuran 3-5 mm dan kadar air 10%-15 %. Limbah kulit kopi yang dipakai pada penelitian ini seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Limbah kulit kopi

Reaktor gasifikasi yang dipakai adalah tipe *downdraft* dengan 3 laluan udara. Terdapat 4 titik/zona untuk mengetahui temperatur yaitu zona 1 atau zona *drying*, zona 2 atau zona pirolisis, zona 3 atau zona oksidasi dan zona 4 atau zona reduksi. Temperatur tiap zona diukur menggunakan termokopel dan ditampilkan dengan bantuan *thermometer reader*. Udara yang masuk ke *gasifier* disuplai dengan menggunakan *blower* melalui sistem perpipaan. *Gasifier* digunakan untuk mengubah limbah kulit kopi melalui proses pembakaran menjadi *syngas*. *Gasifier* tipe *downdraft* dengan 3 laluan udara seperti pada Gambar 2.



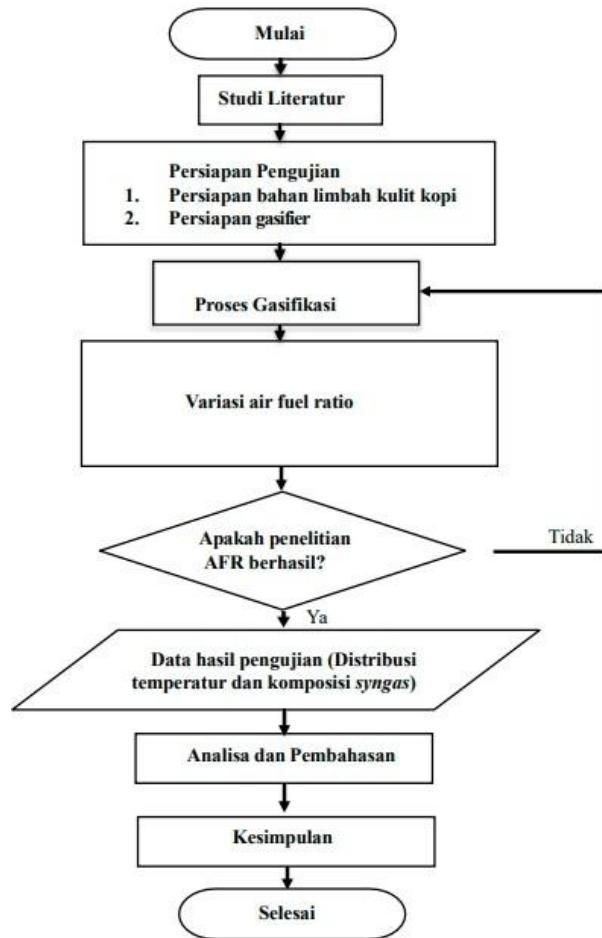
Gambar 2. Reaktor gasifikasi

Reaktor ini dilengkapi dengan *blower* untuk memberikan pasokan udara, *cyclone* untuk menyaring *syngas* dari kandungan debu dan partikel, *water scrubber* sebagai penyaring gas hasil gasifikasi dengan skema penyemprotan air dan *dry filter* sebagai penyaring partikel-partikel kecil pada *syngas*. Peralatan tambahan yang dipakai adalah manometer sebagai alat ukur untuk mengetahui perbedaan tekanan, *stopwatch* sebagai pengukur waktu, kondensor *tar* sebagai pembentuk *tar*, *sampling bag* sebagai penampung dan penyimpan *syngas* dan *gas chromatography* digunakan untuk mengetahui komposisi *syngas*.

Prosedur penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan memvariasikan *Air Fuel Ratio* untuk mendapatkan perbedaan *syngas* setiap variasi, kemudian dicari variasi AFR yang paling optimum. Penggunaan variasi *Air Fuel Ratio* didapatkan dengan mengatur laju alir udara yang masuk ke dalam reaktor. Dengan menggunakan persamaan Bernoulli akan didapatkan perbedaan tekanan pada *pitot static tube* yang terbaca pada manometer. Kemudian dilanjutkan dengan perhitungan-perhitungan teoritis sehingga didapatkan konsentrasi komposisi *syngas* yang terbentuk dan pada akhirnya dilakukan analisis untuk mendapatkan komposisi *syngas* dan kandungan *tar*. Variasi AFR yang digunakan pada penelitian ini adalah 1,63 sebagai sampel 1, 1,65 sebagai sampel 2, 1,67 sebagai sampel 3, dan 1,7 sebagai sampel 4.

Prosedur penelitian dimulai dengan memasukkan 10 kg bahan bakar kulit kopi ke dalam reaktor gasifikasi melalui *hopper*, dilanjutkan dengan menghidupkan *blower*, membuka katup pipa masukan udara, menghidupkan sistem kontrol yang sudah terpasang dan menghidupkan pompa pada *water scrubber* serta pompa hisap. Api mulai dimasukkan ke dalam reaktor melalui saluran yang berada di belakang reaktor untuk membakar bahan bakar limbah kulit kopi. Temperatur dari penyalaan dalam reaktor ditunggu sampai pada suhu gasifikasi tercapai, kemudian memvariasikan *air fuel ratio* dengan mengatur katup udara pada setiap pipa masukan udara agar mendapatkan nilai pada *manometer* sesuai dengan yang sudah dihitung pada nilai variasi AFR. Sampel *syngas* diambil dengan menggunakan *sampling bag* ketika gas hasil gasifikasi dalam kondisi *flammable*. *Syngas* hasil gasifikasi diuji untuk mendapatkan persentase dari komposisi gas dengan menggunakan *gas chromatography*. Nilai kalor dari *syngas* dihitung dari perkalian kalori komposisi *syngas* dengan persentase komposisi *syngas*. Gambar 3 merupakan diagram alir dari penelitian ini.



Gambar 3. Flowchart penelitian

Penelitian ini menerapkan prinsip dasar Keselamatan, Kesehatan, Keamanan Kerja, dan Lingkungan (K3L) selama proses pengembangannya, baik dalam pengumpulan material uji maupun pada proses pengambilan data proses gasifikasi. K3L yang dipatuhi adalah dengan menggunakan sepatu *safety*, sarung tangan, kacamata, *wearpack*, masker dan helm. Sepatu *safety* digunakan untuk melindungi kaki dari benturan, jatuhnya benda logam dan bahan kimia selama proses pengujian proses gasifikasi. Sarung tangan berfungsi untuk melindungi tangan dari benda-benda tajam dan api dari proses pengujian gasifikasi. Kacamata berfungsi untuk melindungi mata dari debu dan asap pada pengujian gasifikasi. *Wearpack* berfungsi untuk melindungi tubuh dari logam, api dan asap gasifikasi. Masker digunakan untuk melindungi saluran pernafasan dari gas-gas hasil proses gasifikasi yang mengandung gas-gas berbahaya. Helm berfungsi untuk melindungi kepala dari benturan atau benda asing yang keras seperti logam yang dapat mengenai kepala selama pengujian di laboratorium gasifikasi. Prosedur pengambilan data dan penyajian data adalah data sebenarnya yang didapat sesuai dengan etika profesi insinyur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur gasifier

Temperatur menjadi faktor yang signifikan dalam proses gasifikasi, karena menentukan keberhasilan proses reaksi pembentukan *syngas*. Pembentukan *syngas* membutuhkan suhu yang tinggi dan juga diperlukan untuk mengurangi kandungan *tar*.

Pada pengujian eksperimental ini, dilakukan pengukuran temperatur pada beberapa zona dengan variasi AFR pada sampel 1, sampel 2, sampel 3 dan sampel 4 pada pengukuran menggunakan termokopel tipe K. Termokopel T1 pada zona pirolisis, termokopel T2 pada zona oksidasi dan T3 pada zona reduksi. Didapatkan data pada Tabel 1.

Tabel 1. Temperatur sampel kulit kop'i

Parameter	Sampel Kulit Kop'i			
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4
Air fuel ratio				
Kandungan air	15%	15%	15%	15%
Ukuran BB	3-5 mm	3-5 mm	3-5 mm	3-5 mm
Suhu pirolisis	216,24°C	262,75°C	255,75°C	255,75°C
Suhu oksidasi	722,25°C	802,25°C	871,25°C	957,75°C
Suhu reduksi	257,50°C	307,75°C	334,75°C	390,25°C

Hasil eksperimen didapatkan pada Tabel 1, di mana suhu tertinggi pada zona oksidasi sebagai reaksi eksotermis dengan nilai tertinggi pada sampel 4 sebesar 957,75°C dan terendah pada sampel 1 sebesar 722,25°C. Temperatur di zona pirolisis antara 262,24°C pada sampel 2 dan 216,24°C pada sampel 1. Temperatur pada zona reduksi tertinggi pada 390,25°C pada sampel 4 dan terendah pada 257,50°C pada sampel 1.

Temperatur pada proses gasifikasi ini sudah sesuai dengan teori di mana temperatur tertinggi terdapat pada zona oksidasi yang merupakan reaksi eksotermis dengan temperatur di atas 750°C. Temperatur pada zona pirolisis juga mencapai 250°C dan temperatur pada zona reduksi lebih tinggi dari zona pirolisis di mana terjadi reaksi eksotermis dan endotermis (Molino et al., 2016).

Distribusi suhu oleh termokopel T1, T2 dan T3 dapat dilihat bahwa pada zona pirolisis menunjukkan nilai suhu yang relatif tinggi dan mencapai suhu yang dibutuhkan untuk pembentukan *syngas*. Pada zona oksidasi menunjukkan nilai suhu yang tinggi dan sudah mencapai suhu yang dibutuhkan untuk pembentukan *syngas*. Sedangkan pada zona reduksi suhu relatif rendah karena tidak meratanya pembakaran pada kulit kop'i sehingga suhu yang terbaca pada termokopel T3 tidak maksimal.

Komposisi *Syngas*

Produk utama proses gasifikasi adalah *syngas*. *Syngas* yang dapat dimanfaatkan untuk mesin diesel adalah *syngas* yang memiliki nilai kalor. *Syngas* yang memiliki nilai kalor atau *combustible gas* terdiri dari CO,

H_2 dan CH_4 . Komposisi *combustible gas* merupakan indikator performansi proses gasifikasi, sehingga semakin tinggi jumlah komposisi *combustible gas*, menandakan performansi gasifikasi yang baik.

Tabel 2. Nilai kalor *combustible gas* (Basu, 2010)

LHV <i>combustible gas</i>			
CO (KJ/m ³)	H_2 (KJ/m ³)	CH_4 (KJ/m ³)	
12633	10783	35833	

Data eksperimen yang dilakukan didapatkan data *syngas* seperti pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Komposisi *syngas* (% Vol.)

Parameter	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4
CO	0,208	5,202	0,118	0,135
H_2	0,507	0,952	0,626	0,525
CH_4	0,530	1,520	0,371	0,370

Komposisi gas CO yang terbentuk selama proses pembakaran terlihat pada Tabel 3. Sampel 1 yang menggunakan variasi AFR 1,63 mendapatkan nilai gas CO sebesar 0,208%, sampel 2 dengan variasi AFR 1,65 mendapatkan nilai gas CO paling tinggi sebesar 5,202%, sampel 3 dengan nilai variasi AFR 1,67 mendapatkan nilai CO sebesar 0,118% dan sampel 4 dengan variasi AFR 1,7 mendapatkan nilai CO sebesar 0,135%. *Air fuel ratio* yang bertambah diiringi dengan bertambahnya laju alir udara ke dalam reaktor menyebabkan pembakaran di zona oksidasi semakin mendekati kondisi stoikiometri sehingga menyebabkan lebih banyak senyawa gas CO_2 yang terbentuk daripada gas dibanding senyawa gas CO. Temperatur pembakaran yang naik juga mengakibatkan reaksi pada carbon (C) di zona reduksi lebih banyak menghasilkan CO_2 .

Komposisi gas H_2 yang terbentuk selama proses pembakaran yaitu sampel 1 yang variasi AFR 1,63 mendapatkan nilai gas H_2 sebesar 0,507%, sampel 2 variasi AFR 1,65 mendapatkan nilai gas H_2 paling tinggi sebesar 0,952%, sampel 3 variasi AFR 1,67 mendapatkan nilai H_2 sebesar 0,626% dan sampel 4 variasi AFR 1,7 mendapatkan nilai H_2 sebesar 0,525%. Kandungan H_2 mencapai optimal pada variasi AFR 1,65 kemudian akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai AFR. Penurunan nilai H_2 disebabkan karena bertambahnya laju aliran udara ke dalam reaktor yang menyebabkan peningkatan reaksi oksidasi pada hidrogen, di mana gas hidrogen yang terbentuk bereaksi dengan oksigen berlebih yang masuk ke dalam reaktor akibat besarnya laju alir udara yang menyebabkan penurunan kandungan H_2 (Sansaniwal et al., 2016).

Komposisi gas CH_4 yang terbentuk selama proses pembakaran yakni sampel 1 variasi AFR 1,63 sebesar 0,530%, sampel 2 variasi AFR 1,65 sebesar 1,520%, variasi AFR 1,7 sebesar 0,370%. Kandungan CH_4 mencapai kondisi optimal pada variasi AFR 1,65 kemudian akan mengalami penurunan seiring dengan

bertambahnya nilai AFR. Penurunan nilai CH_4 disebabkan karena bertambahnya laju aliran udara ke dalam reaktor yang menyebabkan suhu lebih tinggi sehingga reaksi hidrogasifikasi ($\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$) menjadi lebih lambat (Guo et al., 2014).

LHV *syngas*

LHV *syngas* pada masing-masing sampel dihitung dengan cara menjumlahkan nilai kalor dari komposisi *syngas* masing-masing sampel. Nilai kalor hasil perhitungan terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. LHV *Syngas* (KJ/kg)

Parameter	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4
AFR	1,63	1,65	1,67	1,7
Laju alir udara	0,000970	0,001015	0,001015	0,001044
LHV	27,079	130,565	21,528	20,619

Dari data penelitian pada Tabel 4 didapatkan LHV *syngas* selama proses pembakaran. Sampel 1 dengan AFR 1,63 mendapatkan nilai LHV *syngas* sebesar 27,079 KJ/kg, sampel 2 dengan AFR 1,65 mendapatkan nilai LHV *syngas* paling tinggi sebesar 130,565 KJ/kg, sampel 3 dengan AFR 1,67 mendapatkan nilai LHV *syngas* sebesar 21,528 KJ/kg dan sampel 4 dengan AFR 1,7 mendapatkan nilai LHV *syngas* sebesar 20,619 KJ/kg. LHV optimal pada data ini berada pada variasi AFR 1,65 kemudian terjadi penurunan nilai LHV seiring dengan bertambahnya AFR dan laju alir udara yang masuk ke dalam reaktor. Penurunan LHV *syngas* disebabkan karena LHV berbanding lurus dengan semakin menurunnya konsentrasi *syngas* yang dihasilkan pada setiap variasi AFR. LHV *syngas* hasil gasifikasi mempunyai nilai yang sangat kecil dibandingkan bahan bakar minyak dari fosil. LHV dari solar sebagai bahan bakar motor diesel sebesar 45,5 MJ/kg.

KESIMPULAN

Hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan teknologi gasifikasi tipe *downdraft gasifier* memakai tiga laluan udara menggunakan variasi *air fuel ratio* (AFR) didapatkan hasil optimal pada AFR 1,65. Distribusi temperatur terdistribusi dengan baik di setiap zonanya dengan temperatur tertinggi di zona oksidasi. Komposisi *syngas* terbaik pada sampel 2 dengan variasi AFR 1,65 menghasilkan LHV *syngas* sebesar 130,565 KJ/kg. Nilai tersebut masih sangat kecil jika digunakan sebagai energi alternatif bahan bakar *internal combustion engine*. Hal ini karena keterbatasan kapasitas dari *gasifier* yang dipergunakan. Kedepannya dapat dikembangkan kapasitasnya untuk mendapatkan LHV *syngas* lebih besar, sehingga bisa dipakai sebagai bahan bakar *internal combustion engine* (ICE). Teknologi gasifikasi dengan menggunakan tipe *downdraft* memakai 3 laluan udara berbahan baku limbah kulit kopi mampu

menghasilkan *syngas* yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi alternatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada tim peneliti gasifikasi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tidar atas kerja kerasnya dalam penelitian limbah kulit kopi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste management*, 32(4), 625-639.

Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik Indonesia 2023 (Katalog No. 1101001)*. <https://www.bps.go.id/publication/2020/04/29/e9011b3155d45d70823c141f/statistik-indonesia-2020.html>

Basu, P. (2010). Gasification theory and modeling of gasifiers. *Biomass Gasification Design Handbook*, 117.

Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. M. A. (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste management*, 23(1), 1-15.

Doherty, W., Reynolds, A., & Kennedy, D. (2013). Aspen Plus simulation of biomass gasification in a steam blown dual fluidised bed.

Fhisabillila, N. A. (2021). Sektor Perkebunan Kopi di Indonesia. *Jurnal Agribusiness*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Guo, F., Dong, Y., Dong, L., & Guo, C. (2014). Effect of design and operating parameters on biomass gasification in a downdraft fixed bed: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(11), 5625–5633.

Haydary, J. (2016). Gasification of refuse-derived fuel (RDF). *GeoScience Engineering*, 62(1), 37.

Jaojaruek, K., Jarungthammachote, S., Graciano, M. K. B., Wongswan, H., & Homhual, S. (2011). Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach. *Bioresource technology*, 102(7), 4834-4840.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). *ISSN 2527-3000*.

Lestari, V. A., & Priambodo, T. B. (2020). Kajian komposisi lignin dan selulosa dari limbah kayu sisya dekortikasi rami dan cangkang kulit kopi untuk proses gasifikasi downdraft. *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 16(1), 1-8.

Luz, F. C., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Andrade, R. V., Leme, M. M. V., & del Olmo, O. A. (2015). Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Conversion and Management*, 103, 321-337.

Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25.

Najib, L., & Darsopuspito, S. (2012). Karakterisasi proses gasifikasi biomassa tempurung kelapa sistem downdraft kontinyu dengan variasi perbandingan udara-bahan bakar (AFR) dan ukuran biomassa. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1), B187-B190.

Saleh, A. R., Sudarmanta, B., Fansuri, H., & Muraza, O. (2020). Syngas production from municipal solid waste with reduced tar yield by three-stage air inlet downdraft gasifier. *Fuel*, 263, 116509.

Sansaniwal, S. K., Pal, K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017). Recent advances in biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 363–384.

Setyono, A. E., & Kiono, B. F. T. (2021). Dari energi fosil menuju energi terbarukan: potret kondisi minyak dan gas bumi Indonesia tahun 2020–2050. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(3), 154-162.

Susastriawan, A. A. P., & Saptoadi, H. (2017). Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 989-1003.