

Variasi *Equivalence Ratio* Pada Reaktor Gasifikasi *Downdraft* Dengan Bahan Bakar Pelet Serbuk Kayu

I Putu Angga Yuda Pratama^{1)*}

¹⁾Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80361

Email: ipayudapratama199709122023211007@unud.ac.id

doi: <https://doi.org/10.24843/METTEK.2023.v09.i02.p04>

Abstrak

Kebutuhan akan energi fosil dan dampak lingkungan yang diakibatkan merupakan masalah yang harus segera ditangani. Salah satu solusi terhadap masalah ini adalah penggunaan energi berkelanjutan dan teknologi yang ramah lingkungan. Gasifikasi merupakan teknologi yang sesuai karena menggunakan bahan baku yang terbaharukan dan menghasilkan energi berupa *syn gas* yang dapat digunakan untuk bahan bakar pembangkit yang ramah lingkungan. Biomassa pelet kayu merupakan bahan yang banyak terdapat di wilayah hutan seperti Indonesia dan tentunya memiliki nilai kalor yang tinggi sehingga layak digunakan sebagai bahan bakar gasifikasi. Gasifikasi reaktor tipe *downdraft* merupakan jenis gasifikasi yang paling optimal karena menghasilkan produk tar yang paling rendah dibandingkan jenis lainnya. Faktor penting yang mempengaruhi proses gasifikasi adalah *Equivalence Ratio* (ER). Pada penelitian ini, ER akan divariasikan sebesar 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 sesuai dengan literatur yang didapat. Didapatkan hasil bahwa pada ER 0,30, nilai *Fuel Conversion Rate* (FCR) sebesar 3,62 kg/jam dan nilai *Cold Gas Efficiency* (CGE) sebesar 37,26 %. Produk *syn gas* terbaik juga didapat pada ER 0,30, dimana hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ER berpengaruh signifikan pada performa gasifikasi karena terjadi peningkatan temperatur gasifikasi dan suplai udara. Namun jika ER terlalu kecil, waktu gasifikasi akan menjadi lebih panjang dan *flowrate syn gas* akan semakin kecil.

Kata kunci: Gasifikasi *downdraft*, biomassa, ER, FCR, CGE

Abstract

The need for fossil fuels and the environmental impact it causes is a problem that must be addressed promptly. One solution to this issue is the use of sustainable energy and environmentally friendly technology. Gasification is a suitable technology because it utilizes renewable raw materials and produces syngas as an environmentally friendly fuel for power generation. Wood pellet biomass is abundant in forested regions like Indonesia and has high calorific value, making it a viable choice for gasification feedstock. The downdraft gasification reactor is considered the most optimal type because it produces the lowest tar content compared to other types. An important factor influencing the gasification process is the Equivalence Ratio (ER). In this study, ER was varied by 0.15, 0.20, 0.25, and 0.30, as per the literature. The results showed that at an ER of 0.30, the Fuel Conversion Rate (FCR) was 3.62 kg/hour, and the Cold Gas Efficiency (CGE) was 37.26%. The best syngas product was also obtained at an ER of 0.30, indicating that an increase in ER significantly impacts gasification performance due to increased gasification temperature and air supply. However, if the ER is too low, the gasification time will be longer, and the syngas flow rate will be reduced.

Keywords: Downdraft gasification, biomass, ER, FCR, CGE

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan produksi energi dunia pada bahan bakar fosil serta polusi lingkungan yang diakibatkan, merupakan salah satu tantangan terbesar saat ini. Polusi yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil konvensional perlu dikurangi secara signifikan atau dihilangkan, guna menjamin keberlanjutan lingkungan dan mencegah perubahan iklim yang tidak diinginkan [1]. Penggunaan bahan bakar alternatif inovatif dan teknologi pembakaran yang baru dan

Penulis korespondensi,
Email: ipayudapratama199709122023211007@unud.ac.id

efisien untuk pemanfaatan energi yang berkelanjutan sangat penting untuk mencapai transisi yang lancar ke teknologi energi rendah karbon [2].

Energi biomassa adalah sumber energi terbarukan ramah lingkungan yang dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan pemanasan global [3, 4]. Biomassa merupakan produk fotosintesa dimana energi yang diserap digunakan untuk mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen. Biomassa bersifat mudah didapatkan, ramah lingkungan dan terbarukan [5]. Salah satu jenis biomassa yang berlimpah ketersediaannya adalah serbuk kayu. Gasifikasi merupakan salah satu teknologi yang digunakan untuk mengkonversi bahan bakar biomassa menjadi gas mampu bakar [6].

Gasifikasi biomassa adalah proses konversi biomassa padat menjadi campuran gas yang terdiri dari Hidrogen (H_2), Karbon monoksida (CO), Karbon dioksida (CO_2), Metana (CH_4), dan Hidrokarbon ringan seperti Etana, Propana, dan sebagainya [7]. Tar adalah produk sampingan yang tidak diinginkan yang perlu diminimalkan untuk penggunaan yang efisien dari gas bahan bakar yang dihasilkan [8]. Gasifikasi *downdraft* lebih efektif daripada proses gasifikasi lainnya karena sifat esensialnya, konstruksi, dan produksi tar yang rendah [9]. Dalam beberapa tahun ke depan, industri 4.0, digitalisasi, dan transisi energi akan menghasilkan peningkatan signifikan dalam permintaan energi listrik. Dalam skenario ini, gasifikasi adalah teknologi biomassa yang paling cocok untuk menghasilkan energi listrik karena efisiensinya yang lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran langsung, serta emisi yang lebih rendah [10, 11].

Salah satu parameter utama yang mempengaruhi proses gasifikasi adalah ER [12]. Untuk gasifikasi menggunakan agen udara, nilai ER optimum ditemukan bervariasi dalam rentang antara 0,12 [13] dan 0,58 [14]. Rentang ER yang optimal dapat dihubungkan dengan karakteristik bahan baku dan desain gasifier, serta kualitas gas yang dihasilkan. Sebagai contoh, Chen *et al.* [15] melakukan penelitian pada proses gasifikasi biomass digestat pada suhu antara 600 dan 800°C, dengan rentang ER antara 0,25 hingga 0,3. *Low Heating Value* (LHV) optimal sebesar 4,78 MJ/Nm³ dan *Cold Gas Efficiency* (CGE) sebesar 67,01% dicapai pada suhu 800°C dan ER 0,28. Namun, hasil gas optimal sebesar 2,15 Nm³/kg dan kandungan tar minimum sebesar 1,61 g/Nm³ teramati pada ER yang lebih tinggi, yaitu sebesar 0,3. Penelitian lain juga dilakukan oleh Khosasaeng, T. dan R. Suntivarakorn [16] pada gasifikasi *downdraft Refuse Derived Fuel* (RDF) dengan memvariasikan ER dari 0,15 hingga 0,50 untuk mengetahui produksi gas yang dihasilkan dan mengevaluasi titik optimum nilai kalor dan CGE. Ditemukan bahwa kandungan CO paling tinggi (14,72%) saat ER = 0,35; kandungan CH_4 paling tinggi adalah 8,76% saat ER = 0,30; dan kandungan H_2 paling tinggi adalah 8,82% saat ER = 0,25. Kadar O_2 dan CO_2 menunjukkan tren peningkatan ketika ER meningkat karena kondisinya mendekati pembakaran sempurna.

Pada penelitian ini, akan dilakukan pengujian pada reaktor gasifikasi *downdraft* dengan bahan bakar pelet serbuk kayu dan ER divariasikan 0,15; 0,20; 0,25; 0,30. ER akan ditetapkan dengan cara mengatur laju aliran udara *input* dari blower. Adapun variabel bebas yang akan dibahas pada penelitian ini adalah produksi gas hasil gasifikasi, *Fuel Conversion Rate* (FCR) dan CGE.

2. METODE

2.1. Bahan Penelitian

Bahan baku penelitian yang digunakan adalah pelet kayu yang diperoleh dari Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Tahura, Kota Denpasar, Provinsi Bali seperti pada Gambar 1. Pellet yang digunakan mempunyai ukuran diameter 1 cm dan panjang 2 cm, dengan karakteristik seperti Tabel 1 di bawah ini.



Gambar 1. Pelet serbuk kayu di TPST Kota Denpasar

Tabel 1. Hasil uji proximate pelet serbuk kayu

Sampel	Moisture (%)	Volatile (%)	Fixed Carbon (%)	Ash (%)	LHV (cal/gram)
Pelet Kayu	9,62	67,83	18,17	4,38	3434,59

Bahan bakar yang digunakan diuji terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik bahan dan nilai kalor seperti pada Tabel 1. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi pengujian yang akan dilakukan. Sebelum bahan diuji, akan dilakukan pengeringan terlebih dahulu selama 6 jam di dalam oven dengan temperatur 108° untuk mengurangi kadar air di dalam sampel. Berdasarkan Tabel 1 diatas, bahan baku serbuk kayu mempunyai kadar air 9,62 %, volatile 67,83 % dan nilai kalor 3434,59 cal/gram hal ini menunjukkan bahwa bahan baku serbuk kayu dapat digunakan sebagai bahan bakar gasifikasi. Alat uji yang digunakan dalam analisa proximate adalah LECO TGA 701 dengan metode ASTM D7582 MVA Biomass. Untuk uji nilai kalor, pada penelitian ini menggunakan alat uji Parr 1341 Plain Jacket Bomb Calorimeter dengan metode ASTM D240.

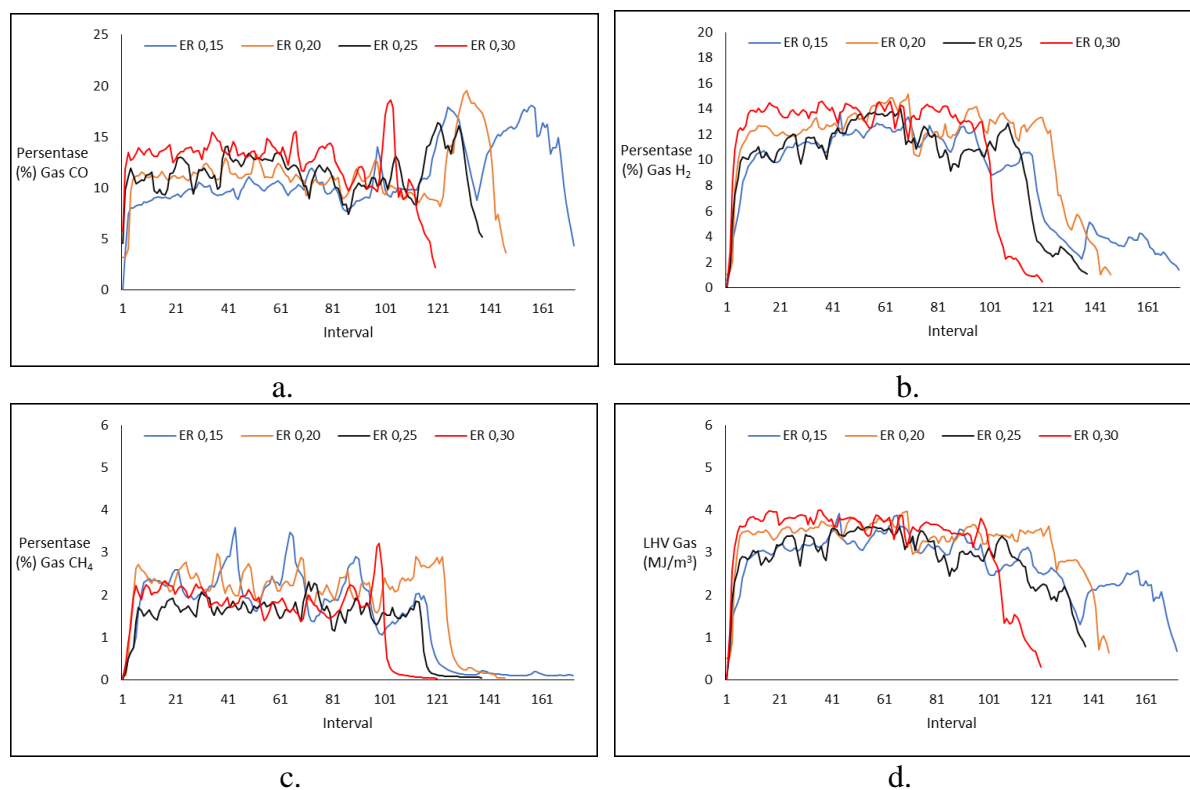
2.2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan uji coba pada reaktor gasifikasi *downdraft* yang di kontrol secara elektronik dengan menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC). Bahan bakar yang digunakan adalah pelet serbuk kayu yang diperoleh dari TPST Kota Denpasar dan dikeringkan selama 4 hari di bawah sinar matahari untuk menyeragamkan kadar air pada bahan bakar. Dalam sekali pengujian, bahan bakar akan diuji sebanyak 5 kg sesuai dengan kapasitas reaktor. *Syn gas* yang dihasilkan akan di uji secara kontinyu menggunakan *Syn Gas Analyzer* GASBOARD-3100P SERIES dengan interval 10 detik. Metode pendekatan eksperimental dalam penelitian ini dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu untuk mengetahui pengaruh ER gasifikasi terhadap produksi *syn gas*, FCR dan CGE pada reaktor gasifikasi *downdraft*. Adapun gambar skematik alat reaktor gasifikasi *downdraft* yang akan diuji pada penelitian ini seperti terlihat pada Gambar 2 berikut ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Produksi *Syn Gas*

Setelah dilakukan pengujian pada masing-masing variabel, produksi *syn gas* ditunjukkan seperti pada Gambar 3 berikut ini,



Gambar 3. Produksi *syn gas*, a. Gas CO; b. Gas H₂; c. Gas CH₄; d. LHV gas.

Berdasarkan Gambar 3 diatas, diketahui produksi *syn gas* dan LHV dari masing-masing variasi. Semakin tinggi nilai ER menunjukkan peningkatan pada produksi gas CO dan H₂ karena meningkatnya gas pereaksi yaitu Oksigen (O₂) sehingga banyak terbentuk gas CO. Semakin meningkat ER juga menaikkan temperatur gasifikasi, hal ini dapat meningkatkan produksi gas H₂. Hasil berbeda ditunjukkan pada produksi gas CH₄, semakin tinggi ER dapat menurunkan kandungan gas CH₄ karena CH₄ termasuk hidrokarbon yang terbentuk akibat sedikitnya suplai oksigen pada proses reaksi pembakaran. Selain itu hidrokarbon juga terbentuk jika temperatur gasifikasi rendah.

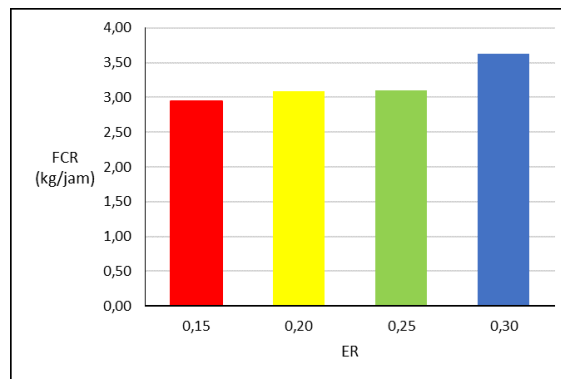
Secara keseluruhan, kandungan terbaik pada *syn gas* ditentukan dari nilai LHV *syn gas*. Dari Gambar 3 menunjukkan tren peningkatan nilai LHV jika nilai ER di tingkatkan, namun interval atau waktu gasifikasi terjadi lebih singkat dibandingkan variasi nilai ER yang rendah. Peningkatan suplai oksigen dalam hal ini udara, dapat menaikkan temperatur dan mempercepat proses gasifikasi. Besaran nilai LHV total gas akan mempengaruhi nilai CGE.

3.2. Fuel Conversion Rate

Besarnya nilai FCR pada masing-masing variasi dihitung berdasarkan berat bahan bakar yang terkonversi menjadi panas dan gas, serta waktu gasifikasi yang ditunjukkan seperti pada tabel dan gambar berikut ini :

Tabel 2. Nilai FCR masing-masing variasi

ER	Berat bb (kg)	Berat arang (kg)	Waktu gasifikasi (jam)	FCR (kg/jam)
0,15	5	0,74	1,45	2,94
0,20	5	1,20	1,23	3,09
0,25	5	1,43	1,15	3,10
0,30	5	1,34	1,01	3,62



Gambar 4. Grafik FCR masing-masing variasi ER

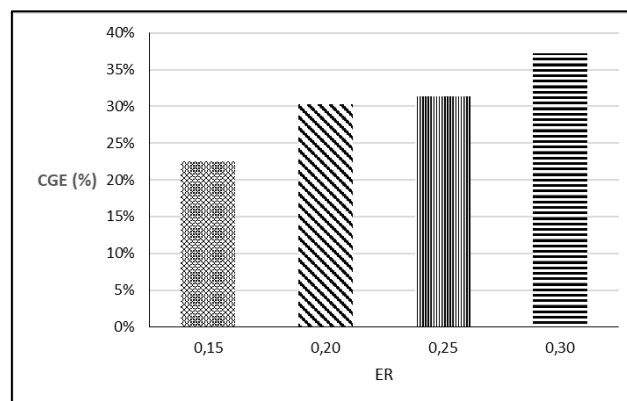
Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Gambar 4 diatas, ditemukan bahwa semakin meningkatnya variasi nilai ER, maka nilai FCR juga ikut meningkat. Nilai FCR tertinggi didapat pada variasi nilai ER 0,30, hal ini menunjukkan semakin meningkatnya suplai udar yang dimasukan kedalam reaktor gasifikasi, maka proses gasifikasi akan berlangsung lebih cepat sehingga bahan bakar yang terkonversi juga semakin banyak. Namun jika nilai ER terlalu tinggi akan mengurangi nilai kalor gas karena akan ada gas pencemar yang meningkat seperti gas CO₂.

3.3. Cold Gas Efficiency

Setelah dilakukan perhitungan terhadap data-data penelitian yang didapat, bisa ditunjukkan hasil nilai efisiensi gasifikasi CGE seperti pada tabel dan gambar grafik berikut ini:

Tabel 3. Nilai CGE masing-masing variasi ER

ER	Flowrate Gas (m ³ /jam)	LHV BB (MJ)	LHV Gas (MJ)	CGE (%)
0,15	4,10	71,85	16,21	22,56%
0,20	5,50	71,85	21,78	30,31%
0,25	6,80	71,85	22,53	31,36%
0,30	8,20	71,85	26,77	37,26%



Gambar 5. Grafik CGE masing-masing variasi ER

Berdasarkan data yang didapat setelah dilakukan pengujian, nilai CGE tertinggi diperoleh pada nilai ER 0,30 yaitu sebesar 37,26 % dan terendah pada nilai ER 0,15 sebesar 22,56 %. Hal ini menunjukkan pengaruh suplai udara sangat signifikan terhadap nilai CGE, FCR dan kandungan *syn* gas. Suplai udara atau nilai ER yang sesuai akan menghasilkan performa gasifikasi yang maksimal sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chen *et al.* [15], namun jika ingin mendapatkan waktu gasifikasi yang lama dan *flowrate* gas yang rendah, maka ER dapat diturunkan hingga 0,15. Jika ER diturunkan dibawah 0,15, proses gasifikasi tidak bisa terjadi karena suplai udara dan temperatur menjadi sangat rendah.

4. SIMPULAN

Penelitian dilakukan pada reaktor gasifikasi *downdraft* dengan menggunakan bahan bakar pelet kayu yang didapat dari TPST Kota Denpasar. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan nilai FCR, CGE dan produk *syn* gas terbaik pada variasi ER 0,30 dengan nilai FCR 3,62 kg/jam dan CGE 37,26 %. Variasi ER 0,15 mendapatkan hasil terendah yaitu, FCR 2,94 kg/jam, CGE 22,56 %. Hal ini menunjukkan bahwa nilai ER terbaik yang digunakan pada reaktor gasifikasi *downdraft* adalah sebesar 0,30.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Laboratorium Research NRCE (New Renewable and Conservation Energy) yang telah mendukung alat-alat penelitian. Terimakasih juga kepada TPST Kota Denpasar yang telah memberikan sampel pelet kayu sebagai bahan baku pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vujanović, M., et al., *Sustainable energy technologies and environmental impacts of energy systems*. Applied Energy, **256**: p. 113919. 2019.
- [2] Krajačić, G., et al., *Integrated approach for sustainable development of energy, water and environment systems*. Energy Conversion and Management, **159**: p. 398-412. 2018.
- [3] Tri Setioputro, N., et al., *Investigation of reactor temperature and performance of syngas cooling system for vacuum gasification of soaked biomass*. Case Studies in Thermal Engineering, **50**: p. 103430. 2023.
- [4] Soeder, D.J. and S.J. Borglum, *The fossil fuel revolution: Shale gas and tight oil*. Elsevier. 2019.
- [5] Yuda Pratama, I.P.A., I.N.S. Winaya, and I.G.P.A. Suryawan, *Uji Reaktor Gasifikasi Downdraft Biomassa Sampah Kota*. Jurnal Mettek: Jurnal Ilmiah Nasional dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin; Vol 5 No 2 (2019). 2020.
- [6] Arya Darma, I.W., I.N.S. Winaya, and I.K.G. Wirawan, *Studi Pengaruh Temperatur Reaktor Gasifikasi Terhadap Fuel Conversion Rate Gasifikasi Dual Reactor Fluidized Bed*. Jurnal Mettek: Jurnal Ilmiah Nasional dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin; Vol 4 No 2 (2018). 2018.
- [7] Timsina, R., et al., *Experimental evaluation of wood and grass pellets in a bubbling fluidized bed gasifier*. Energy Reports, **9**: p. 4049-4058. 2023.
- [8] Kumar, P., et al., *Experimental assessment of producer gas generation using agricultural and forestry residues in a fixed bed downdraft gasifier*. Chemical Engineering Journal Advances, **13**: p. 100431. 2023.
- [9] Ramalingam, S., B. Rajendiran, and S. Subramiyan, *Recent advances in the performance of Co-Current gasification technology: A review*. International Journal of Hydrogen Energy, **45**(1): p. 230-262. 2020.
- [10] Puglia, M., et al., *A preliminary evaluation of different residual biomass potential for energy conversion in a micro-scale downdraft gasifier*. Sustainable Energy

- Technologies and Assessments, **57**: p. 103224. 2023.
- [11] Situmorang, Y.A., et al., *Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **117**: p. 109486. 2020.
- [12] Rabea, K., et al., *Real-time performance investigation of a downdraft gasifier fueled by cotton stalks in a batch-mode operation*. Fuel, **300**: p. 120976. 2021.
- [13] Nisamaneenate, J., et al., *Fuel gas production from peanut shell waste using a modular downdraft gasifier with the thermal integrated unit*. Renewable Energy, **79**: p. 45-50. 2015.
- [14] Yoon, S.J., et al., *Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier*. Renewable Energy, **42**: p. 163-167. 2012.
- [15] Chen, G., et al., *Air gasification of biogas-derived digestate in a downdraft fixed bed gasifier*. Waste Management, **69**: p. 162-169. 2017.
- [16] Khosasaeng, T. and R. Suntivarakorn, *Effect of Equivalence Ratio on an Efficiency of Single Throat Downdraft Gasifier Using RDF from Municipal solid waste*. Energy Procedia, **138**: p. 784-788. 2017.
- [17] Lestander, T.A., et al., *Gasification of pure and mixed feedstock components: Effect on syngas composition and gasification efficiency*. Journal of Cleaner Production, **369**: p. 133330. 2022.