

Variasi *Equivalence Ratio* Pada Gasifikasi *Downdraft* Berbahan Bakar RDF Sampah Kota

I Made Dony Mei Hermawan^{1)*}, I Nyoman Suprpta Winaya²⁾, I Gede Putu Agus Suryawan³⁾, I Putu Angga Yuda Pratama⁴⁾

¹⁾Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80361
Email: donymeihermawan11@gmail.com

²⁾Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali

doi: <https://doi.org/10.24843/METTEK.2024.v10.i01.p02>

Abstrak

Gasifikasi telah terbukti sebagai metode yang efektif dalam mengatasi masalah pengelolaan sampah padat kota (Municipal Solid Waste, MSW), dengan potensi menghasilkan gas yang dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar atau diolah menjadi bahan baku terbarukan untuk aplikasi skala kecil hingga besar. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas MSW, khususnya nilai kalor dan kerapatan, dengan mengubahnya menjadi Refused Derived Fuel (RDF). Diketahui bahwa peningkatan kerapatan bahan bakar membutuhkan jumlah udara (oksigen) yang optimal untuk mencapai efisiensi gasifikasi maksimum. Metode eksperimental digunakan untuk menguji kinerja bahan bakar RDF dalam reaktor gasifikasi downdraft dengan memvariasikan konsumsi udara, yang diukur dalam equivalence ratio (ER), pada rentang 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, dan 0.35. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tertinggi Fuel Conversion Rate pada RDF adalah 1,96 kg/jam pada ER 0.15, sementara Cold Gas Efficiency (CGE) tertinggi tercapai pada ER 0.30 sebesar 80.39%. Hal ini mengindikasikan bahwa penyesuaian ER berdampak signifikan terhadap kinerja gasifikasi, dengan peningkatan ER menyebabkan naiknya suhu gasifikasi dan pasokan udara yang lebih baik. Namun, ER yang terlalu rendah dapat menyebabkan proses gasifikasi menjadi lebih lama dan mengurangi laju aliran gas sintesis, dan sebaliknya. Penelitian ini memberikan wawasan tentang pentingnya pengaturan ER yang optimal dalam proses gasifikasi RDF untuk meningkatkan efisiensi energi dan pengelolaan MSW yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci: Gasifikasi, Municipal Solid Waste (MSW), Refused Derived Fuel (RDF), Equivalence Ratio (ER), Efisiensi Gasifikasi

Abstract

Gasification has been proven as an effective method for managing municipal solid waste (MSW), with the potential to produce gas that can be directly used as fuel or processed into renewable raw materials for small to large-scale applications. This study aims to improve the quality of MSW, particularly its calorific value and density, by converting it into Refused Derived Fuel (RDF). It is known that increasing the fuel density requires an optimal amount of air (oxygen) to achieve maximum gasification efficiency. An experimental method was used to test the performance of RDF fuel in a downdraft gasification reactor by varying air consumption, measured in equivalence ratio (ER), within the range of 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, and 0.35. The results showed that the highest Fuel Conversion Rate for RDF was 1.96 kg/hour at an ER of 0.15, while the highest Cold Gas Efficiency (CGE) was achieved at an ER of 0.30, amounting to 80.39%. This indicates that adjusting the ER significantly impacts gasification performance, with an increase in ER causing a rise in gasification temperature and

better air supply. However, an ER that is too low can prolong the gasification process and reduce the flow rate of synthesis gas, and vice versa. This study provides insights into the importance of optimal ER setting in the RDF gasification process to enhance energy efficiency and promote more sustainable MSW management.

Keywords: *Gasification, Municipal Solid Waste (MSW), Refused Derived Fuel (RDF), Equivalence Ratio (ER), Gasification Efficiency*

1. PENDAHULUAN

Sampah atau limbah merupakan suatu fenomena yang sering ditemui di lingkungan masyarakat perkotaan maupun pedesaan. Sampah adalah permasalahan utama yang sedang dihadapi diseluruh dunia tidak terkecuali di Indonesia. Negara ini juga menghasilkan limbah yang dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sebesar 64 juta ton/hari sampah yang menyebabkan masalah kesehatan yang merugikan bagi kesehatan manusia dan pencemaran lingkungan [1]. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan sampah yang tepat untuk mengonversi sampah tersebut seperti salah satu provinsinya yaitu Provinsi Bali yang dimana sampah dihasilkan sebagian besar berasal dari buangan sisa-sisa aktivitas masyarakat di Bali seperti sampah plastik, janur, bunga sisa persembahyangan, sampah sisa bangunan (kayu, triplek, dan bambu). Karakteristik dan jumlah sampah yang dihasilkan suatu wilayah bergantung pada tingkat kehidupan di kota atau negara tersebut. Sampah yang dihasilkan di negara berkembang memiliki proporsi sampah organik yang lebih besar, sedangkan sampah di negara maju lebih beragam dengan proporsi sampah plastik dan kertas yang relatif lebih besar. [2]

Jika tidak dikelola dengan benar ini akan membuat berbagai masalah sosial dan lingkungan termasuk polusi udara, tanah, air dan penyebaran penyakit. [3]. Salah satu solusinya adalah menggunakan sampah sebagai sumber daya energi alternatif dengan menerapkan konsep “*Waste to Energy*” [4]. Sampah organik, plastic dan kayu dapat digunakan sebagai bahan bakar terbarukan dengan mengolahnya menjadi pelet / *Refuse Derived Fuel (RDF)*. Limbah/sampah padat (organik dan anorganik) dapat dimanfaatkan dalam proses termokimia seperti pembakaran, *hidrogenasi*, *pirolisis*, dan gasifikasi.

Gasifikasi *downdraft* lebih efektif daripada proses gasifikasi lainnya karena sifat esensialnya, konstruksi, dan produksi tar yang rendah [5] Produk utama dari proses gasifikasi adalah *syngas*, *tar*, dan *char* dengan jumlah dan karakteristik yang dipengaruhi oleh komposisi awal bahan baku dan kondisi operasional [6]. Gasifikasi merupakan salah satu metode paling efektif untuk mengatasi masalah sampah padat *Municipal Solid Waste (MSW)* karena gas yang dihasilkan dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar atau sebagai bahan baku terbarukan untuk yang berskala besar [7]. Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi adalah campuran gas yang mudah terbakar (*syngas*) seperti CO, H₂, dan CH₄ dan gas yang tidak mudah terbakar seperti CO₂ dan N₂ [8].

Salah satu parameter utama yang mempengaruhi proses gasifikasi adalah ER [9]. Untuk gasifikasi menggunakan agen udara, nilai ER optimum ditemukan bervariasi dalam rentang antara 0,12 [10] dan 0,58 [11]. Rentang ER yang optimal dapat dihubungkan dengan karakteristik bahan baku dan desain gasifier, serta kualitas gas yang dihasilkan. Sebagai contoh Gafur [12] melakukan penelitian mengenai metode pemasukan udara bertingkat dengan menggunakan biomassa pelepah kelapa sawit, menghasilkan komposisi gas terbaik diperoleh pada kondisi aliran udara total 19,2 Nm³/jam (ER=0,4), dengan LHV gas dari 4106 kJ/Nm³ menjadi 4822 kJ/Nm³. Chen *et al.* [13] juga melakukan penelitian mengenai proses gasifikasi biomass digestat pada suhu antara 600°C dan 800°C, dengan rentang ER antara 0,25 hingga 0,3. *Low Heating Value (LHV)* optimal didapatkan 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 di peroleh sebesar 2,15 Nm³/kg dan kandungan tar minimum yang didapatkan sebesar 1,61 g/Nm³ terdapat pada ER yang lebih tinggi, yaitu sebesar 0,3.

Dalam penelitian ini, pengujian akan dilakukan pada reaktor gasifikasi downdraft menggunakan bahan bakar RDF, dengan variasi Equivalence Ratio (ER) pada nilai 0,15; 0,20; 0,25; 0,30, dan 0,35. Penetapan nilai ER akan dilakukan dengan mengatur laju aliran udara input dari blower. Variabel bebas yang akan diinvestigasi meliputi produksi gas hasil gasifikasi, Fuel Conversion Rate (FCR), dan Cold Gas Efficiency (CGE). Bahan bakar RDF yang akan digunakan dalam proses gasifikasi downdraft merupakan hasil pengolahan sampah kota yang mengandung campuran bahan organik (biomassa) dan bahan anorganik (plastik) dengan perbandingan massa 95% organik dan 5% anorganik, dan kemudian dibentuk pelet, perbandingan ini ditetapkan berdasarkan survei yang dilakukan oleh [14] di beberapa TPS3R yang melakukan proses pemilahan, dari proses pemilahan ada 5% sampah plastik yang ikut terbawa. Sehingga ditetapkan perbandingan 95% organik 5% plastik dalam 1kg Bahan bakar.

2. BAHAN DAN METODE PENELITIAN

2.1. Bahan Penelitian

Bahan baku penelitian yang digunakan adalah RDF, Dimana RDF didapatkan dari TPST Desa Sampalan Tengah, Kabupaten Klungkung, 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. RDF

Tabel 1. Hasil uji proximate pelet serbuk kayu

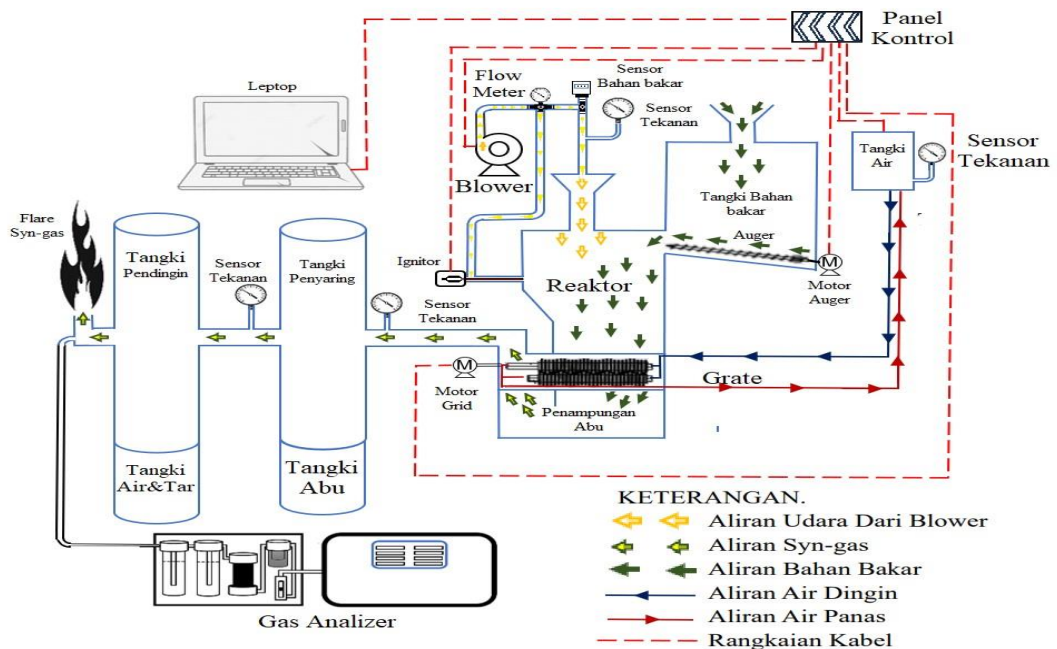
Sampel	Moisture (%)	Volatile (%)	Fixed Carbon (%)	Ash (%)	LHV (cal/gram)
RDF	11.22	71.00	12.62	18.67	3349,97

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 110° untuk mengurangi kadar air di dalam sampel. Berdasarkan Tabel 1 diatas, bahan baku RDF memiliki kadar air 11,22%, volatile sebesar 71,00% dan nilai kalor yang cukup tinggi yaitu sebesar 3349,97 cal/gram hal ini menunjukkan bahwa bahan baku RDF bagus dan dapat digunakan sebagai bahan bakar gasifikasi alat uji yang digunakan untuk pengujian proximate adalah LECO TGA 701 dengan metode ASTM D7582 MVA Biomass. Sedangkan 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 di lakukan pada reaktor gasifikasi *downdraft* yang dikontrol secara elektronik menggunakan Programmable Logic Controller (PLC). Bahan bakar yang digunakan adalah RDF, yang sebelum diuji pada reaktor downdraft, dikeringkan selama 6 jam dalam oven untuk menjaga kadar air bahan bakar agar seragam. Dalam setiap pengujian, jumlah bahan bakar yang diuji adalah sebanyak 5 kg, sesuai dengan kapasitas reaktor. Syn gas yang dihasilkan akan diuji secara kontinyu dengan menggunakan Syn Gas Analyzer GASBOARD-3100P SERIES dengan

interval pengukuran 30 detik. Metode pendekatan eksperimental digunakan sesuai dengan tujuan penelitian, yakni untuk menilai dampak Equivalence Ratio (ER) dalam gasifikasi



downdraft terhadap produksi syn gas, Fuel Conversion Rate (FCR), dan Cold Gas Efficiency (CGE) pada reaktor gasifikasi downdraft. Skema alat reaktor gasifikasi downdraft yang akan diuji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2. Skematik alat reaktor gasifikasi *downdraft*

Untuk pemantik awal akan dimasukan sedikit arang batok kelapa sebagai bahan bakar pemicu awal. *Igniter* akan dinyalakan untuk menyulut arang hingga temperatur gasifikasi tercapai di rentang 600 – 800°C. Sebelum bahan bakar dimasukan, ER akan diatur sesuai dengan variabel penelitian yang dilakukan dengan cara mengatur laju aliran udara pada blower. Setelah dilakukan pengaturan kondisi gasifikasi, bahan bakar yang sudah di masukan sebanyak 5 kg pada tangki bahan bakar akan dimasukan secara otomatis kedalam reaktor dengan menggunakan *auger*. *Syn gas* hasil gasifikasi akan terdorong ke tangki penyaringan untuk dibersihkan dan didinginkan pada tangki pendinginan. Sampel gas akan uji secara kontinyu menggunakan *Syn Gas Analyzer* GASBOARD-3100P SERIES dengan interval 30 detik dan sisanya akan dibakar agar tidak mencemari lingkungan. Data yang didapat kemudian di olah dalam tabel dan grafik untuk mendapatkan nilai FCR dan CGE.

FCR adalah laju konversi bahan bakar padat menjadi gas atau jumlah konversi bahan bakar per satuan waktu [6]. Bahan bakar yang dikonversi pada proses gasifikasi dapat dihitung menggunakan rumus :

$$FCR = \frac{m_g}{t_g} = \frac{m_{bb} - m_{ar}}{t_g} \quad (1)$$

- m_g : massa gasifikasi (kg)
- m_{bb} : massa bahan bakar awal (kg)
- m_{ar} : massa arang (kg)
- t_g : waktu gasifikasi (jam)

Efisiensi gasifikasi biasanya dinyatakan dalam bentuk CGE. Nilai CGE dapat dihitung berdasarkan pengaplikasian dari *syn gas* yang dihasilkan. Misalnya, jika *syn gas* akan dibakar dalam turbin gas untuk pembangkitan listrik, CGE dapat dihitung berdasarkan energi yang tersimpan dalam semua komponen gas mampu bakar [15].

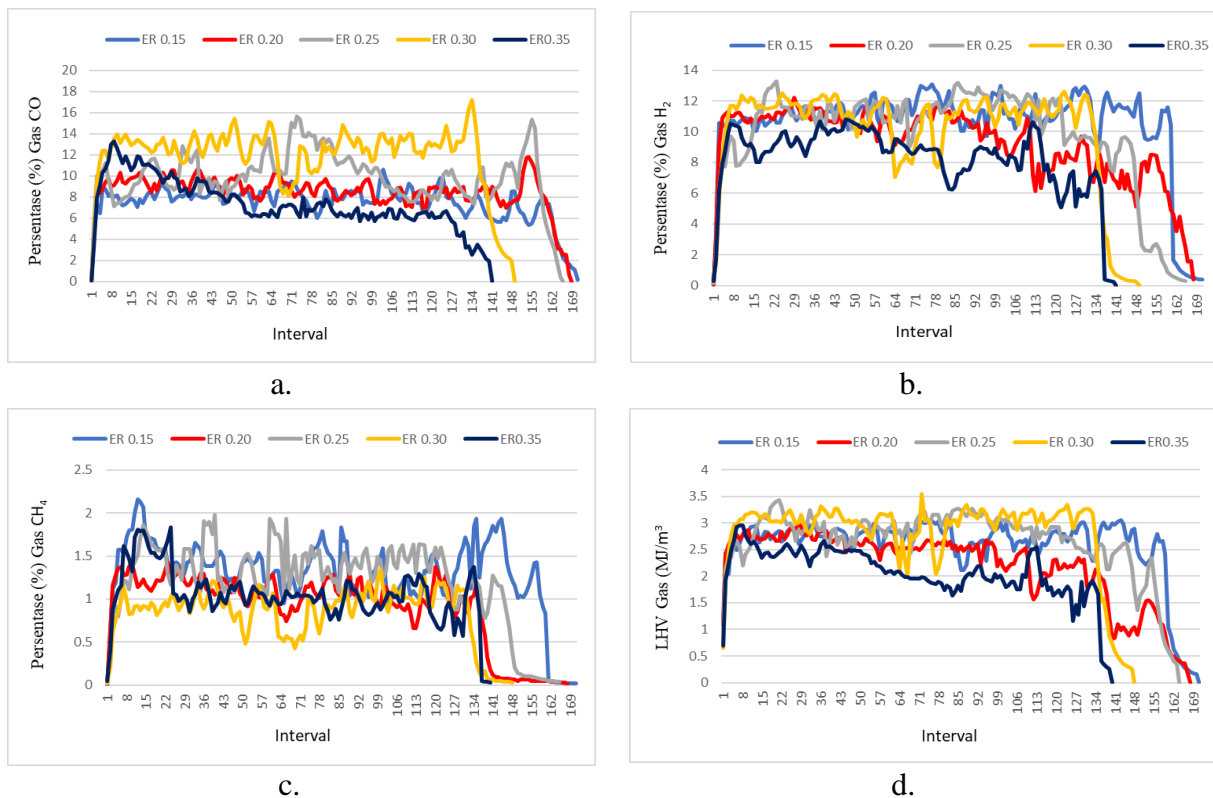
$$CGE(\%) = \frac{X \times LHF_g}{Y \times LHV_{bb}} \times 100 \quad (2)$$

- X : volume *syn gas* yang dihasilkan (m³)
 Y : massa bahan bakar total (kg)
 LHV_{bb} : nilai kalor bawah bahan bakar (MJ/kg)
 LHV_g : nilai kalor bawah gas (MJ/m³)

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 hal ini dikarena meningkatnya gas pereaksi yaitu Oksigen (O₂) sehingga banyak terbentuk gas CO. Semakin meningkat ER juga menaikkan temperatur gasifikasi. 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 sampai pada ER 0.30, namun interval atau waktu gasifikasi terjadi lebih singkat dibandingkan variasi nilai ER yang rendah. Phenomena tersebut tidak terjadi pada ER 0.35 yang disebabkan oleh peningkatan nilai ER yang mempengaruhi kecepatan gasifikasi, semakin tinggi nilai ER gasifikasi berlangsung semakin cepat, sehingga laju pemasukan bahan bakar semakin cepat pula oleh karena itu putaran auger juga semakin cepat hal ini mengakibatkan bahan bakar hancur karena putaran auger yang semakin cepat mengakibatkan penurunan kualitas syngas dan

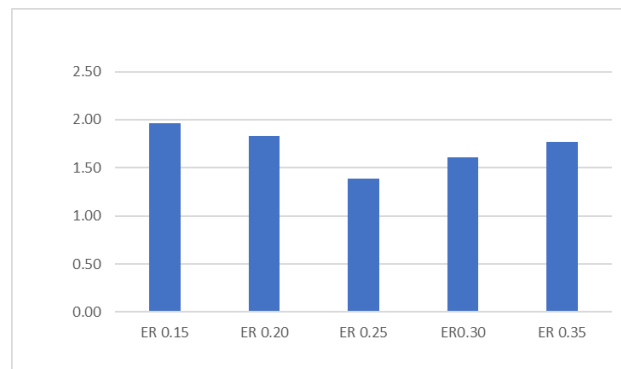
nilai kalor, hal tersebut juga membuktikan bahwa pemadatan pada RDF dapat meningkatkan kualitas syngas, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wiyono [1] dimana *densifikasi* (peletisasi) mampu meningkatkan nilai kalor produksi bahan bakar dan syngas pada gasifikasi. Peningkatan suplai oksigen 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	3,844	1,16	1,37	1,96
0,20	3,763	1,29	1,34	1,85
0,25	3,688	1,85	1,33	1,39
0,30	3,603	1,72	1,17	1,61
0,30	3,564	1,66	1,06	1,80



Gambar 4. Grafik FCR masing-masing variasi ER

Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Gambar 4 diatas, ditemukan bahwa pada variasi ER 0,15 sampai ER 0,25 FCR cenderung menurun hal ini disebabkan oleh terbentuknya aglomerasi yang cukup besar dapat dilihat pada gambar 5, sehingga menyebabkan terganggunya proses gasifikasi dan penyumbatan sehingga bahan bakar yang terkonversi menurun yang mengakibatkan nilai dari FCR turun. Pada variasi ER 0.30 dan ER 0.35 terjadi peningkatan FCR yang disebabkan oleh peningkatan nilai ER mengakibatkan proses gasifikasi semakin cepat dan aglomerasi yang terbentuk memiliki ukuran yang tidak terlalu besar sehingga tidak terlalu menghambat proses gasifikasi sehingga bahan bakar yang terkonversi semakin banyak. Namun jika nilai ER terlalu tinggi akan mengurangi nilai kalor gas karena akan ada gas pencemar yang meningkat seperti gas CO₂.



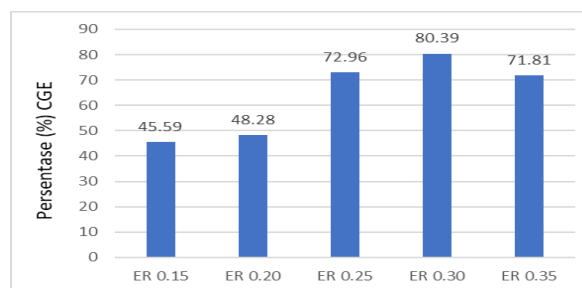
Gambar 5. Aglomorasi yang terbentuk pada gasifikasi downdraft

3.2. Cold Gas Efficiency

Setelah dilakukan perhitungan terhadap data-data penelitian yang didapat, dapat ditunjukkan hasil nilai efisiensi gasifikasi *Cold Gas Efficiency* 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/kg)	LHV Gas (MJ/m ³)	CGE (%)
0,15	6,21	14,0257	2,77	45,59%
0,20	8,28	14,0257	2,20	48,28%
0,25	10,35	14,0257	2,62	72,96%
0,30	12,42	14,0257	2,66	80,39%
0,35	14,49	14,0257	2,12	71,81%



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 80,39% dan terendah pada nilai ER 0,15 sebesar 45,59 %. Hal ini menunjukkan peningkatan nilai ER atau suplai udara sangat signifikan terhadap nilai CGE, 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 nilai ER terlalu tinggi akan mengakibatkan penurunan nilai dari CGE. Apabila 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 yang rendah akan mengakibatkan temperature menjadi sangat rendah sedangkan proses gasifikasi terjadi pada temperature tinggi.

4. SIMPULAN

Penelitian dilakukan pada reaktor gasifikasi *downdraft* dengan menggunakan bahan bakar RDF yang didapatkan dari TPST Desa Sampalan Tengah, Kabupaten Klungkung, Bali. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan nilai FCR, tertinggi didapatkan pada variasi ER 0.15 sebesar 1,96 kg/jam dan nilai *Cold Gas Efficiency* (CGE) tertinggi didapatkan pada ER 0.30 sebesar 80.39%. Ini menunjukkan bahwa peningkatan Equivalence Ratio (ER) memiliki dampak signifikan pada kinerja gasifikasi karena menyebabkan peningkatan suhu gasifikasi dan pasokan udara. Namun, jika ER terlalu rendah, waktu gasifikasi dapat memanjang dan laju aliran gas sintesis akan semakin kecil begitu juga sebaliknya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai ER terbaik yang digunakan pada reaktor gasifikasi *downdraft* adalah sebesar 0,30.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Grup Riset NRCE (New Renewable and Conservation Energy) yang telah mendukung alat-alat penelitian dan membantu dalam penelitian ini. Terimakasih juga kepada TPST Desa Sampalan Tengah yang telah memberikan sampel pelet RDF sebagai bahan

baku pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wiyono, A., Saw, L. H., Anggrainy, R., Husen, A. S., Purnawan, Rohendi, D., Gandidi, I. M., Adanta, D., & Pambudi, N. A. (2021). Enhancement of syngas production via co-gasification and renewable densified fuels (RDF) in an open-top downdraft gasifier: Case study of Indonesian waste. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27(July).
- [2] Sudiby, H., Majid, A. I., Pradana, Y. S., Budhijanto, W., Deendarlianto, & Budiman, A. (2017). Technological Evaluation of Municipal Solid Waste Management System in Indonesia. *Energy Procedia*, 105, 263–269.
- [3] Perrot, J. F., & Subiantoro, A. (2018). Municipal waste management strategy review and waste-to-energy potentials in New Zealand. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9).
- [4] Burlakovs, J., Kriipsalu, M., Porshnov, D., Jani, Y., Ozols, V., Pehme, K. M., Rudovica, V., Grinfelde, I., Pilecka, J., Vincevica-Gaile, Z., Turkadze, T., Hogland, W., & Klavins, M. (2019). Gateway of landfilled plastic waste towards circular economy in Europe. *Separations*, 6(2), 1–8.
- [5] 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.
- [6] Benedetti, V., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2018). Characterization of char from biomass gasification and its similarities with activated carbon in adsorption applications. *Applied Energy*, 227(January), 92–99.
- [7] Erkiaga, A., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Influence of operating conditions on the steam gasification of biomass in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 237, 259–267.
- [8] Susastriawan, A. A. P., Saptoadi, H., & Purnomo. (2017). Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(May 2016), 989–1003.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Gafur, A. (2017). *Studi Eksperimantal Gasifikasi Pelepah Kelapa Sawit untuk Meningkatkan Performansi Reaktor Downdraft dengan Masukan Udara Bertingkat*. 1–81.
- [13] Chen, G., et al., *Air gasification of biogas-derived digestate in a downdraft fixed bed gasifier*. Waste Management, 69: p. 162-169. 2017.
- [14] Yuda Pratama, I. P. A., Winaya, I. N. S., & Suryawan, I. G. P. A. (2020). Uji Reaktor Gasifikasi Downdraft Biomassa Sampah Kota. *Jurnal METTEK*, 5(2), 110.
- [15] 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.