

PENGARUH BENTUK LUBANG UDARA SEKUNDER PADA KOMPOR GASIFIKASI BIOMASSA SEKAM PADI PEMBAKARAN

Zurohaina¹, Ahmad Zikri¹, Safril Kartika Wardana¹, Naddya Anastasya Zahra¹, Maulidya Zahra Tunisa¹, Fathur Rahman¹

¹Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara Bukit Besar, Palembang, 30139, Sumatera Selatan, Indonesia

Email : zurohaina@polsri.ac.id; rahmanfathur5555@gmail.com

Abstrak : Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia, namun pemanfaatannya sebagai sumber energi masih terbatas. Salah satu teknologi yang potensial untuk mengonversi sekam padi menjadi energi adalah kompor gasifikasi biomassa. Teknologi ini mampu menghasilkan panas yang lebih bersih dan efisien dibandingkan dengan pembakaran langsung. Namun, penggunaan sekam padi dalam kompor gasifikasi sering mengalami kendala dalam hal efisiensi pembakaran dan emisi gas buang yang belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh bentuk lubang udara sekunder serta modifikasi sistem distribusi aliran udara pada kompor gasifikasi biomassa terhadap performa pembakaran sekam padi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan tahapan utama meliputi perancangan, fabrikasi, dan pengujian kompor gasifikasi yang dimodifikasi pada bagian lubang udara sekunder dan sistem distribusi aliran udara. Desain lubang udara sekunder yang bervariasi dan sistem distribusi yang dioptimalkan akan diuji melalui metode Water Boiling Test (WBT) untuk mengevaluasi efisiensi thermal dan tingkat konsumsi bahan bakar.

Kata kunci: Sekam Padi; Kompor Gasifikasi Biomassa; Lubang Udara Sekunder; Energi Terbarukan; Efisiensi Thermal

Abstract : Rice husk is an abundant agricultural waste in Indonesia; however, its utilization as an energy source remains limited. One potential technology for converting rice husk into energy is the biomass gasification stove. This technology can produce cleaner and more efficient heat compared to direct combustion. However, the use of rice husk in gasification stoves often faces challenges related to combustion efficiency and suboptimal exhaust gas emissions. This study aims to analyze the effect

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2026, Vol. 7, No. 2, pp 1 – 11

Received : 26 Maret 2026

Accepted : 29 April 2026

Published : 21 Mei 2026



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

of secondary air hole shapes and modifications to the air distribution system in a biomass gasification stove on the combustion performance of rice husk. The research employs an experimental method with main stages including the design, fabrication, and testing of a modified gasification stove focusing on the secondary air holes and air distribution system. Variations in the secondary air hole design and optimized distribution systems are tested using the Water Boiling Test (WBT) method to evaluate thermal efficiency and fuel consumption rate.

Keywords: Rice Husk; Biomass Gasification Stove; Secondary Air Holes; Renewable Energy; Thermal Efficiency

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara agraris dengan produksi padi yang tinggi setiap tahunnya. Limbah pertanian berupa sekam padi dihasilkan dalam jumlah besar dan hingga kini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Sutrisno et al. (2023) melaporkan bahwa sebagian besar sekam padi masih dibuang atau dibakar secara terbuka, yang berkontribusi terhadap pencemaran udara dan pemborosan potensi energi. Padahal, sekam padi memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan bakar biomassa, khususnya untuk aplikasi termokimia.

Berbagai studi menunjukkan bahwa sekam padi memiliki kandungan karbon dan zat terbang yang cukup tinggi serta kadar air yang relatif rendah, sehingga berpotensi menghasilkan energi melalui proses gasifikasi (Gupta et al., 2023; Chen et al., 2024). Proses gasifikasi biomassa merupakan salah satu teknologi konversi energi yang mampu mengubah bahan bakar padat menjadi gas mudah terbakar melalui reaksi termokimia dengan suplai udara terbatas (McKendry, 2017; Basu, 2018). Dibandingkan pembakaran langsung, teknologi ini menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi serta emisi polutan yang lebih rendah.

Salah satu implementasi gasifikasi skala kecil yang banyak dikembangkan adalah kompor gasifikasi tipe top-lit updraft (TLUD). Beberapa penelitian melaporkan bahwa kompor TLUD memiliki keunggulan dalam stabilitas nyala api, efisiensi termal, serta kemampuan memanfaatkan biomassa dengan ukuran partikel kecil seperti sekam padi (Kumar & Patel, 2022; Osei et al., 2020). Namun demikian, kinerja kompor TLUD sangat dipengaruhi oleh desain sistem suplai udara, khususnya konfigurasi dan distribusi udara sekunder yang berperan penting dalam pembakaran gas hasil gasifikasi.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa optimasi lubang udara sekunder dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi karbon monoksida (CO) secara signifikan (Ramadhan et al., 2020; Hafid et al., 2020). Desain lubang udara yang mampu menciptakan aliran turbulen atau swirl dilaporkan dapat memperbaiki pencampuran antara udara dan gas volatil, sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna (Chen et al., 2023; Mersha et al., 2024). Selain itu, laju alir udara yang tidak tepat, baik terlalu rendah maupun terlalu tinggi, dapat menurunkan efisiensi pembakaran akibat keterbatasan suplai oksigen atau waktu tinggal gas yang terlalu singkat (Wulandari et al., 2021).

Meskipun sejumlah penelitian telah membahas pengaruh suplai udara sekunder dan desain kompor TLUD, kajian eksperimental yang secara spesifik menggabungkan variasi bentuk lubang udara sekunder dengan pengaturan laju alir udara pada kompor gasifikasi berbahan bakar biopellet

sekam padi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh modifikasi lubang udara sekunder berbentuk vortex dan variasi laju alir udara terhadap kinerja kompor gasifikasi biomassa, yang ditinjau dari efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik, karakteristik nyala api, serta emisi gas hasil pembakaran.

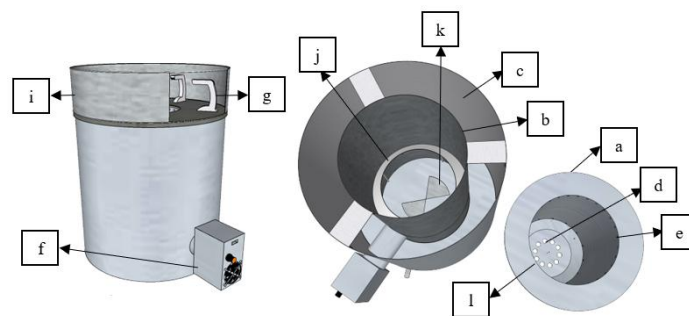
2. Metodologi

2.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan dari April hingga Juli 2025 di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya. Studi eksperimental ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh bentuk lubang yang berbahan bakar sekam padi terhadap kinerja kompor biomassa.

2.2. Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, alat utama yang digunakan adalah sebuah kompor gasifikasi biomassa tipe Top-Lit Up-Draft (TLUD). Kompor ini dilengkapi dengan fan yang dapat diatur untuk mengontrol laju aliran udara primer dan sekunder, dengan kecepatan yang divariasikan pada 5, 6, dan 7 m/s. Variabel kunci dalam eksperimen ini adalah bentuk lubang udara sekunder, yang terdiri dari dua desain: bentuk lingkaran standar (desain pabrik) dan bentuk vortex (modifikasi). Peralatan pendukung yang digunakan untuk pengukuran dan pengambilan data meliputi thermogun untuk mengukur temperatur nyala api, anemometer digital untuk memastikan kecepatan aliran udara, timbangan presisi untuk menimbang bahan bakar, serta gas analyzer yang dilengkapi dengan gas sampling bag untuk mengukur konsentrasi emisi gas CO dan CO₂. Pengujian kinerja kompor dilakukan dengan metode Water Boiling Test (WBT) menggunakan panci aluminium berkapasitas 2500 ml yang diisi air, dengan suhu dan waktu didih dipantau menggunakan termometer air raksa dan stopwatch. Bahan bakar yang digunakan adalah biopellet dari sekam padi, yang sebelumnya telah dianalisis karakteristiknya menggunakan Thermogravimetric Analyzer (TGA) untuk mengetahui komposisi proksimat dan ultimatnya, sehingga memastikan konsistensi kualitas bahan bakar selama proses penelitian berlangsung.



Gambar 3.1 Alat Kompor Biomassa

2.3. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengevaluasi kinerja kompor gasifikasi biomassa berbahan bakar biopellet sekam padi. Sebelum pengujian, bahan bakar dianalisis menggunakan uji proksimat dan ultimat untuk mengetahui karakteristik dasar yang memengaruhi proses gasifikasi dan pembakaran (Gupta et al., 2023; Singh et al., 2024).

Rancangan percobaan melibatkan tiga kelompok variabel. Variabel tetap meliputi massa bahan

bakar sebesar 1 kg dan jenis bahan bakar sekam padi. Variabel bebas terdiri atas bentuk lubang udara sekunder dengan dua variasi, yaitu lingkaran normal dan lingkaran vortex, serta laju alir udara dari kipas sebesar 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s. Variabel terikat yang diukur sebagai indikator kinerja kompor mencakup efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik, temperatur nyala api, emisi CO dan CO₂, efisiensi pembakaran, serta waktu pendidihan air (Kumar & Patel, 2022; Wang et al., 2024).

Pengujian kinerja kompor dilakukan menggunakan metode Water Boiling Test (WBT). Setiap percobaan diawali dengan penimbangan 1 kg bahan bakar dan 2 liter air, kemudian kompor dinyalakan dan parameter kinerja diukur selama proses pembakaran. Metode WBT dipilih karena mampu memberikan evaluasi kinerja kompor biomassa yang konsisten dan dapat dibandingkan antarvariasi desain dan kondisi operasi (Osei et al., 2020).

$$S_c = \frac{\Delta m_k}{\Delta t}$$

Dimana:

Δm_k = massa bahan bakar yang terpakai (kg)
 Δt = lama waktu pengujian (jam)

Sesuai dengan SNI 7928:2013, efisiensi termal dievaluasi dengan membandingkan total panas yang diserap oleh air dengan panas yang dilepaskan dari bahan bakar selama proses pembakaran, termasuk kontribusi panas sensibel dan laten.

$$\eta_T = \frac{m_a C_p \Delta T + \Delta m_a L}{\Delta m_k LHV}$$

Dimana:

η_T = efisiensi termal (%)
 m_a = massa air (kg)
 C_p = kalor jenis air (4180 J/kg·°C)
 ΔT = selisih suhu air akhir dan awal (°C)
 Δm_a = Mass of fuel consumed (kg)
 L = kalor penguapan air (J/kg)
 Δm_k = massa bahan bakar yang terpakai (kg)
 LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (J/kg)

3. Hasil

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa hasil penelitian yaitu data analisa, perhitungan dan pengamatan yang dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Hasil Analisa *Ultimate* Bahan Bakar Biomassa

Komponen	Biopellet Sekam Padi (%wt)
C	51,03
H	5,77
N	0,35
O	42,71
S	0,14

Total	100
--------------	------------

(Sumber: Analisa Laboratorium PT Geoservices Coal Laboratory Palembang, 2024)

Tabel 2. Hasil Analisa *Proximate* Bahan Bakar Biomassa

Komponen	Biopellet Sekam Padi (%wt)
<i>Moisture</i>	4,74
<i>Volatile Matter</i>	45,55
<i>Fix Carbon</i>	35,25
<i>Ash</i>	14,45
Total	100

(Sumber: Analisa Laboratorium Batubara dan Biomassa, Jurusan Teknik Kimia Polsri, 2025)

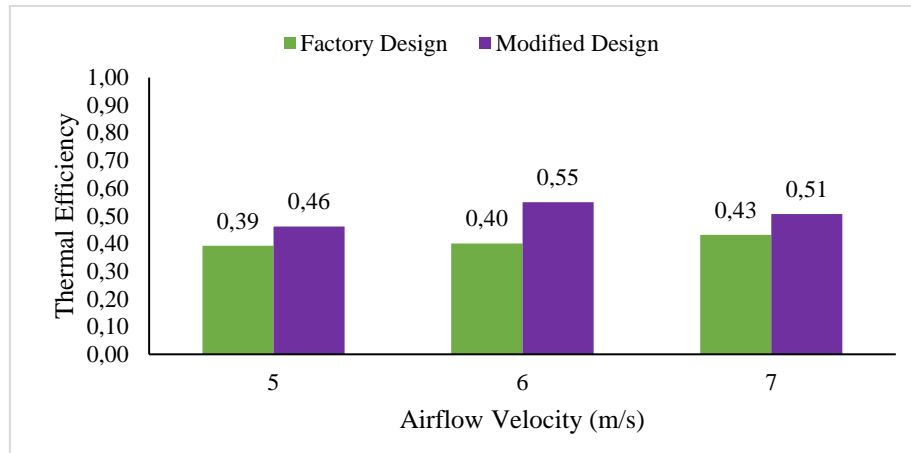
4. Pembahasan

4.1 Analisa Kandungan Bahan Bakar Biomassa yang Digunakan

Berdasarkan hasil analisis ultimat dan proksimat, biopellet sekam padi menunjukkan karakteristik yang mendukung aplikasi gasifikasi. Kandungan karbon (51,03%) dan hidrogen (5,77%) berperan sebagai kontributor utama nilai kalor, sementara kandungan oksigen yang relatif tinggi (42,71%) memungkinkan kebutuhan udara eksternal yang lebih rendah selama proses pembakaran. Kandungan nitrogen (0,35%) dan sulfur (0,14%) yang rendah mengindikasikan potensi pembentukan emisi NO_x dan SO_x yang minimal, sehingga lebih ramah lingkungan (Gupta et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Hasil analisis proksimat menunjukkan kadar air yang rendah (4,74%) yang menguntungkan bagi efisiensi gasifikasi, serta kandungan zat terbang yang tinggi (45,55%) yang mendukung pembentukan syngas. Karbon terikat sebesar 35,25% berkontribusi terhadap kestabilan nyala api selama pembakaran, meskipun kandungan abu yang relatif tinggi (14,45%) berpotensi menyebabkan permasalahan slagging dan fouling pada sistem gasifikasi (Singh et al., 2024; Kumar et al., 2024).

4.2 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal

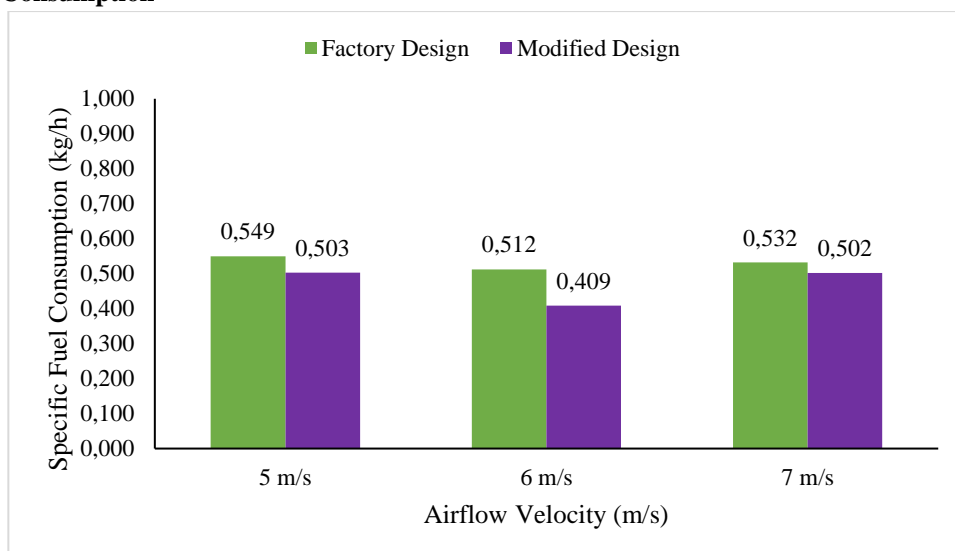


Gambar 4. 1 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi lubang udara sekunder berbentuk vortex dengan laju alir udara 6 m/s menghasilkan efisiensi termal tertinggi sebesar 54,95%. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan desain lubang udara standar yang hanya mencapai efisiensi maksimum sebesar 43,16%. Peningkatan kinerja pada desain vortex disebabkan oleh terbentuknya aliran swirl yang meningkatkan turbulensi dan memperbaiki pencampuran antara udara sekunder dan gas hasil gasifikasi, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih sempurna dan transfer panas menjadi lebih efektif (Garcia et al., 2024; Chen et al., 2023).

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa optimasi geometri lubang udara sekunder berperan signifikan dalam meningkatkan efisiensi termal pada kompor gasifikasi biomassa (Kumar & Patel, 2022; Mersha et al., 2024).

4.3 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Specific Fuel Consumption

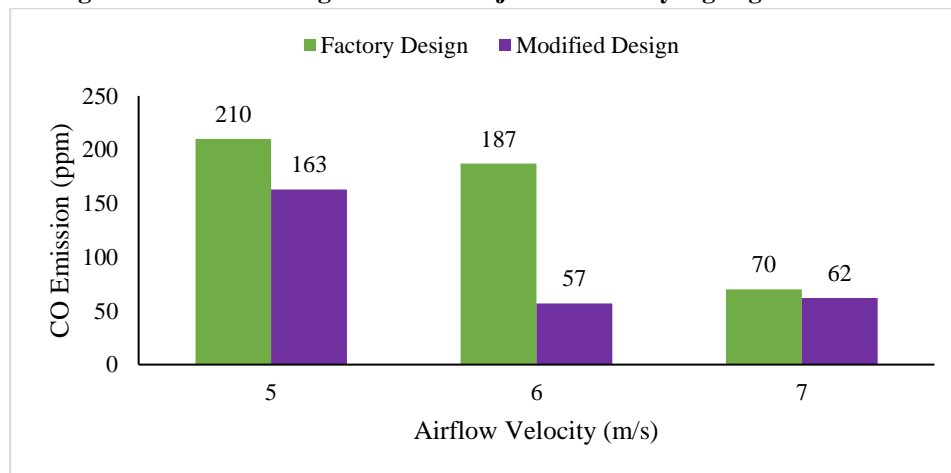


Gambar 4. 2 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap *Specific Fuel Consumption*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain lubang udara sekunder vortex pada laju alir udara 6 m/s menghasilkan konsumsi bahan bakar spesifik terendah sebesar 0,40862 kg/jam. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan desain lubang udara standar yang mencapai 0,51198 kg/jam pada kondisi operasi yang sama. Penurunan konsumsi bahan bakar spesifik ini berkorelasi langsung dengan peningkatan efisiensi termal, yang menunjukkan bahwa pembakaran berlangsung lebih efektif dan energi dari bahan bakar dimanfaatkan secara optimal.

Kombinasi desain vortex dan laju alir udara 6 m/s menciptakan kondisi pembakaran yang lebih stabil melalui peningkatan turbulensi dan pencampuran udara sekunder dengan gas hasil gasifikasi. Kondisi ini mengurangi fraksi bahan bakar yang tidak terbakar sempurna, sehingga menekan pemborosan bahan bakar. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa desain kompor gasifikasi TLUD yang optimal mampu menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah (Osei et al., 2020; Kumar & Patel, 2022).

4.4 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO

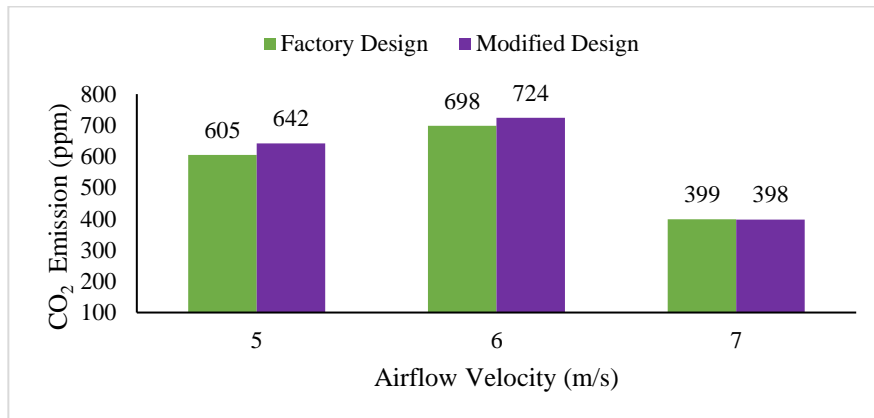


Gambar 4. 3 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO

Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain lubang udara sekunder vortex pada laju alir udara 6 m/s menghasilkan emisi CO terendah sebesar 57 ppm. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan desain lubang udara standar yang menghasilkan emisi CO sebesar 187 ppm pada kondisi operasi yang sama. Penurunan emisi CO ini menunjukkan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna, di mana karbon monoksida teroksidasi lebih lanjut menjadi karbon dioksida akibat ketersediaan oksigen yang lebih memadai.

Keunggulan desain vortex disebabkan oleh terbentuknya aliran swirl yang meningkatkan turbulensi dan homogenitas pencampuran antara udara sekunder dan gas hasil gasifikasi. Kondisi ini memperbaiki proses pembakaran sekunder dan menekan pembentukan gas CO. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa optimasi geometri lubang udara sekunder berbentuk vortex efektif dalam menurunkan emisi CO pada kompor gasifikasi biomassa (Merasha et al., 2024; Chen et al., 2023).

4.5 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO₂

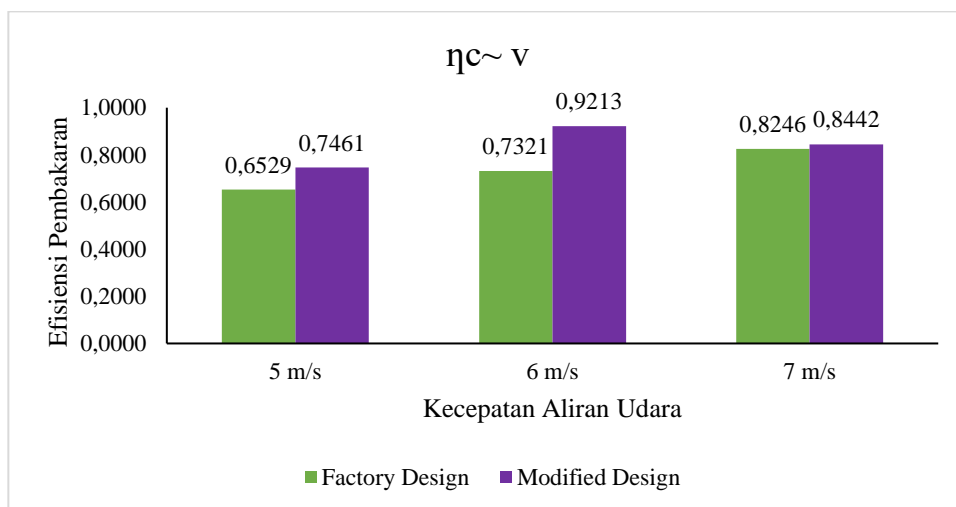


Gambar 4. 4 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO₂

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi CO₂ tertinggi diperoleh pada desain lubang udara sekunder vortex dengan laju alir udara 6 m/s, yaitu sebesar 724 ppm, lebih tinggi dibandingkan desain lubang standar yang menghasilkan 698 ppm pada kondisi yang sama. Peningkatan konsentrasi CO₂ ini mengindikasikan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna, di mana sebagian besar karbon teroksidasi secara optimal menjadi CO₂.

Sebaliknya, pada laju alir udara 7 m/s, emisi CO₂ pada kedua desain mengalami penurunan signifikan hingga kisaran 398–399 ppm. Penurunan ini disebabkan oleh waktu tinggal gas yang semakin singkat pada kecepatan udara yang terlalu tinggi, sehingga proses oksidasi tidak berlangsung secara optimal. Fenomena ini menunjukkan adanya kondisi laju alir udara optimum dalam sistem gasifikasi, sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kecepatan udara berlebih dapat menurunkan kualitas pembakaran meskipun suplai oksigen meningkat (Wulandari et al., 2021; Kumar & Patel, 2022).

4.6 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran

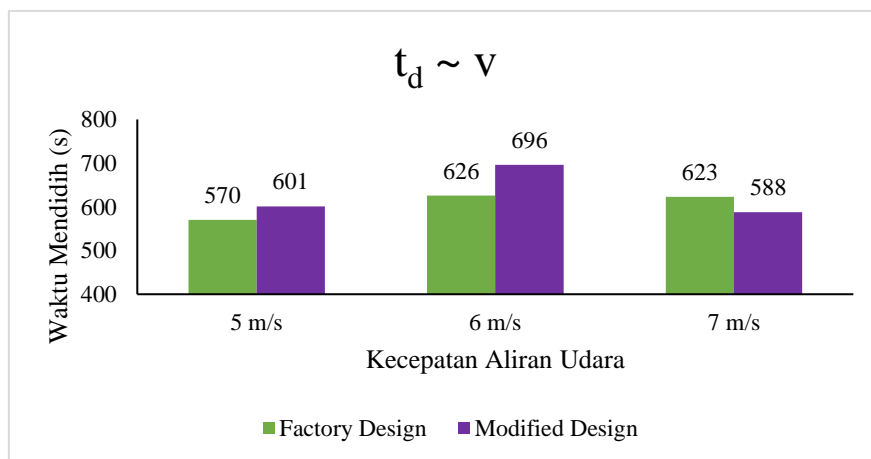


Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran

Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain lubang udara sekunder vortex pada laju alir udara 6 m/s menghasilkan efisiensi pembakaran tertinggi sebesar 92,13%, jauh lebih tinggi dibandingkan desain lubang udara standar yang hanya mencapai 73,21% pada kondisi yang sama. Peningkatan efisiensi pembakaran ini berkorelasi langsung dengan penurunan emisi CO serta peningkatan emisi CO₂, yang mengindikasikan berlangsungnya proses pembakaran yang lebih sempurna.

Keunggulan desain vortex disebabkan oleh terbentuknya aliran swirl yang meningkatkan turbulensi dan memperpanjang waktu tinggal gas volatil di zona pembakaran sekunder, sehingga proses oksidasi CO menjadi CO₂ berlangsung lebih optimal. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa optimasi suplai udara sekunder melalui modifikasi geometri lubang udara berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pembakaran pada kompor gasifikasi biomassa (Mersha et al., 2024; Kumar & Patel, 2022).

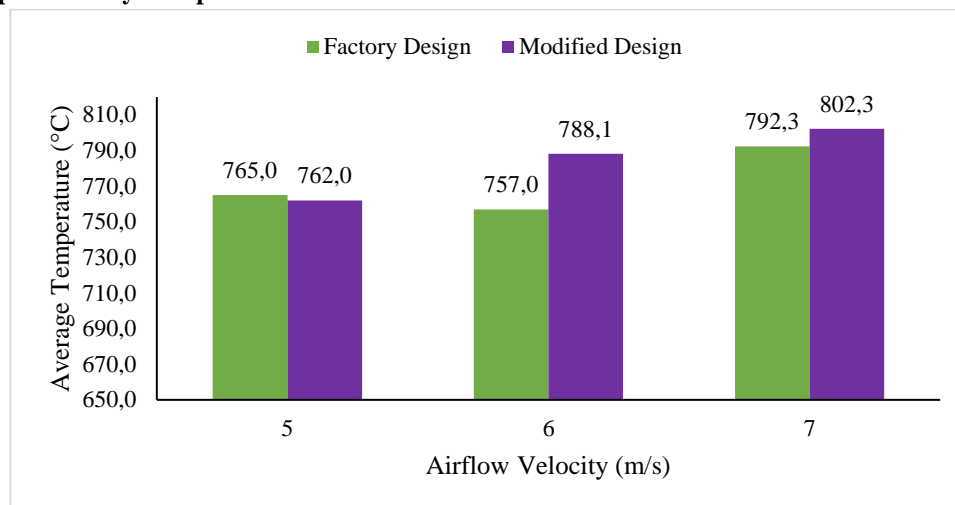
4.7 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih



Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu mendidih tercepat diperoleh pada desain standar dengan kecepatan udara 5 m/s (570 detik) dan desain vortex pada kecepatan 7 m/s (588 detik). Namun, hasil ini tidak menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara variasi desain lubang udara maupun laju alir udara terhadap waktu mendidih. Hal ini mengindikasikan bahwa waktu mendidih tidak semata-mata ditentukan oleh kinerja pembakaran, tetapi juga dipengaruhi oleh efektivitas perpindahan panas dari nyala api ke panci serta stabilitas nyala api selama proses pemanasan. Temuan ini sejalan dengan Osei et al. (2020) yang menyatakan bahwa peningkatan efisiensi termal tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan waktu mendidih akibat pengaruh karakteristik perpindahan panas sistem.

4.8 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata



Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata

Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain lubang udara vortex pada kecepatan 7 m/s menghasilkan temperatur nyala api tertinggi sebesar 802,3°C, lebih tinggi dibandingkan desain standar yang mencapai 792,3°C pada kondisi yang sama. Pada kedua desain, peningkatan kecepatan aliran udara cenderung meningkatkan temperatur nyala api akibat bertambahnya suplai oksigen yang mendukung reaksi oksidasi. Desain vortex secara konsisten menghasilkan temperatur lebih tinggi pada setiap kecepatan yang diuji, yang menunjukkan kemampuannya dalam meningkatkan intensitas pembakaran melalui pencampuran udara dan gas bahan bakar yang lebih efektif. Temuan ini sejalan dengan Mersha et al. (2024) yang melaporkan bahwa aliran swirl meningkatkan turbulensi dan laju reaksi kimia sehingga pelepasan energi panas menjadi lebih optimal.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, modifikasi lubang udara sekunder berbentuk vortex dengan laju aliran udara 6 m/s terbukti sebagai konfigurasi paling optimal dalam meningkatkan kinerja kompor gasifikasi biomassa berbahan bakar sekam padi. Desain ini mampu meningkatkan efisiensi termal hingga 54,95% dan menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik menjadi 0,40862 kg/jam. Dari sisi pembakaran, efisiensi pembakaran mencapai 92,13% dengan emisi CO yang rendah sebesar 57 ppm, yang menunjukkan proses pembakaran berlangsung lebih sempurna. Peningkatan emisi CO₂ hingga 724 ppm pada kondisi optimal mengindikasikan konversi karbon yang lebih lengkap. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi distribusi udara sekunder melalui desain vortex berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas pembakaran pada kompor gasifikasi skala rumah tangga. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada pengembangan variasi geometri vortex dan penerapannya pada jenis biomassa lokal lainnya.

Daftar Pustaka

- Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction* (3rd ed.). Academic Press.
- McKendry, P. (2017). Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83, 55–63.

- Kumar, R., & Patel, S. (2022). TLUD gasifier stoves: A comprehensive review of design and performance. *Biomass and Bioenergy*, 167, 106–118.
- Osei, I., et al. (2020). Design, fabrication and evaluation of non-continuous inverted downdraft gasifier stove utilizing rice husk as feedstock. *Scientific African*, 8, e00414.
- Osei, B., Mensah, E., & Asante, K. (2020). Design and development of a TLUD gasifier cookstove. *Journal of Energy Engineering*, 146, 04020015.
- Gupta, A., Sharma, S., & Kumar, N. (2023). Rice husk characterization for thermochemical conversion processes. *Bioresource Technology*, 385, 129–138.
- Chen, L., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). Thermochemical characterization and ash behavior of rice husk. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101735.
- Singh, P., Yadav, V., & Kumar, A. (2024). Biomass characterization and its impact on gasification performance. *Fuel Processing Technology*, 255, 108–119.
- Mendoza, A., Silva, J., & Santos, R. (2023). Recent advances in biomass gasification technology. *Energy Reports*, 9, 512–525.
- Mersha, A., Bekele, A., & Fetene, G. (2024). Optimization of secondary air holes in biomass gasification stoves. *Energy for Sustainable Development*, 78, 101–112.
- Chen, L., Wang, Y., Zhang, H., & Li, X. (2023). Advanced secondary air design for improved biomass combustion efficiency. *Renewable Energy*, 195, 135–145.
- Ramadhan, R., et al. (2020). Optimization of secondary air flow in biomass gasification stoves. *International Journal of Energy Research*, 44, 6453–6461.
- Hafid, M., Wahyudi, & Saptoadi, H. (2020). Pengaruh laju aliran udara terhadap kinerja kompor biomassa. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11, 23–30.
- Wulandari, S., Rahayu, D., & Novianti, E. (2021). Emisi dan efisiensi termal kompor gasifikasi sekam padi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19, 78–85.
- Sutrisno, J., Prasetyo, D., & Hidayat, A. (2023). Rice husk utilization for energy generation in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113–125.