

## Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap *Over-Fire* Menggunakan Bahan Bakar Kayu Cemara Gunung

Novriany Amaliyah<sup>1</sup>, Nurmila J<sup>1</sup>, Baharuddin Mire<sup>1</sup>, Andi Mangkau<sup>1</sup>, Ismail Rahim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin,  
Jl. Poros Malino Km. 6 Bontomarannu Gowa, 90

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar  
Jl. Mallengkeri Raya, Makassar

\*ismail\_rahim@unm.ac.id

Diterima: 11 05 2026

Direvisi: 15 07 2026

Disetujui: 31 07 2026

### ABSTRAK

Penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran sekaligus mengurangi emisi gas hasil pembakaran pada sistem tungku skala kecil. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja tungku biomassa dengan sistem injeksi uap *over-fire* menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung melalui variasi volume air injeksi. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Parameter yang dianalisis meliputi laju konsumsi bahan bakar, daya termal, konsumsi spesifik bahan bakar, efisiensi termal, serta emisi CO dan CO<sub>2</sub>. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan volume air injeksi menurunkan laju konsumsi bahan bakar dan konsumsi spesifik bahan bakar, serta meningkatkan stabilitas pembakaran. Variasi 1200 ml menghasilkan kinerja terbaik dengan laju konsumsi bahan bakar sebesar 0,0012 kg/s, daya termal sebesar 3,2977 kkal/s, dan efisiensi termal mencapai 51%. Dari sisi emisi, peningkatan volume air injeksi menghasilkan pola emisi CO yang lebih stabil dan peningkatan CO<sub>2</sub> yang konsisten, yang mengindikasikan pembakaran lebih sempurna. Meskipun daya termal menurun, redistribusi energi ke sistem injeksi uap berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi keseluruhan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem injeksi uap berbasis energi internal berpotensi meningkatkan efisiensi dan kualitas pembakaran pada tungku biomassa skala kecil.

**Kata kunci:** biomassa, injeksi uap, efisiensi termal, emisi, tungku biomassa

### ABSTRACT

*The use of biomass as an alternative energy source continues to be developed to improve combustion efficiency while reducing exhaust gas emissions in small-scale furnace systems. This study aims to analyze the performance of a biomass furnace with an over-fire steam injection system using mountain pine wood as fuel through variations in injected water volume. The method used was an experimental approach with three variations of injected water volume, namely 500 ml, 800 ml, and 1200 ml. The parameters analyzed included fuel consumption rate, thermal power, specific fuel consumption, thermal efficiency, as well as CO and CO<sub>2</sub> emissions. The results showed that increasing the injected water volume reduced the fuel consumption rate and specific fuel consumption, while improving combustion stability. The 1200 ml variation produced the best performance with a fuel consumption rate of 0.0012 kg/s, thermal power of 3.2977 kcal/s, and thermal efficiency reaching 51%. In terms of emissions, increasing the injected water volume resulted in a more stable CO emission pattern and a consistent increase in CO<sub>2</sub>, indicating more complete combustion. Although thermal power decreased, the redistribution of energy to the steam injection system contributed to improving the overall efficiency. These results indicate that an internal energy-based steam injection system has the potential to improve efficiency and combustion quality in small-scale biomass furnaces.*

**Keywords:** biomass, steam injection, thermal efficiency, emissions, biomass stove

## PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global yang dipicu oleh pertumbuhan populasi dan aktivitas industri telah meningkatkan konsumsi bahan bakar fosil secara signifikan. Ketergantungan terhadap energi fosil tidak hanya mempercepat penipisan cadangan energi, tetapi juga meningkatkan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan menjadi salah satu strategi utama dalam mewujudkan sistem energi yang berkelanjutan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, biomassa memiliki potensi yang sangat besar karena bersifat terbarukan, tersedia secara lokal, serta memiliki siklus karbon yang relatif netral apabila dikelola secara berkelanjutan [1],[2].

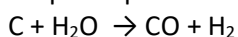
Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi biomassa terbesar di kawasan tropis. Potensi biomassa yang berasal dari limbah kehutanan, limbah pertanian, dan hasil hutan diperkirakan mencapai lebih dari 35 juta ton per tahun [1],[2]. Potensi tersebut membuka peluang besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif, terutama pada daerah pedesaan yang masih memiliki keterbatasan akses terhadap energi modern. Namun demikian, pemanfaatan biomassa pada skala rumah tangga masih didominasi oleh penggunaan tungku biomassa sederhana dengan efisiensi pembakaran yang relatif rendah serta menghasilkan emisi karbon monoksida (CO), partikulat, dan hidrokarbon yang tinggi akibat proses pembakaran yang belum sempurna [3],[4].

Salah satu jenis tungku biomassa yang banyak digunakan adalah tungku tipe rocket stove karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya pembuatan yang rendah, serta mampu menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan tungku tradisional. Meskipun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar tungku biomassa skala kecil masih memiliki efisiensi termal di bawah 40% dan menghasilkan emisi gas buang yang cukup tinggi akibat pencampuran udara dan gas volatil yang belum optimal selama proses pembakaran [5]–[8]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas pencampuran antara udara oksidator dan gas hasil pirolisis masih menjadi salah satu tantangan utama dalam pengembangan tungku biomassa.

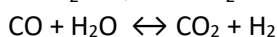
Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan performa pembakaran biomassa, di antaranya melalui teknik under-fire air, over-fire air, staged combustion, penggunaan blower, maupun sistem jet flame [9]–[11]. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi pembakaran, memperbaiki distribusi temperatur, serta menurunkan emisi karbon monoksida melalui peningkatan suplai oksigen pada zona pembakaran sekunder. Akan tetapi, hampir seluruh sistem tersebut masih mengandalkan udara paksa (forced air) yang memerlukan energi listrik eksternal untuk mengoperasikan blower atau kipas. Ketergantungan terhadap sumber energi tambahan tersebut menyebabkan teknologi ini kurang sesuai diterapkan pada daerah terpencil yang memiliki keterbatasan akses listrik.

Selain optimasi suplai udara, beberapa penelitian juga mengembangkan modifikasi geometri ruang bakar, pengaturan rasio udara–bahan bakar, serta sistem pemanfaatan panas buang (heat recovery) untuk meningkatkan efisiensi pembakaran [11]. Walaupun mampu meningkatkan performa sistem, pendekatan tersebut umumnya memerlukan modifikasi konstruksi yang relatif kompleks sehingga implementasinya pada tungku biomassa skala kecil masih terbatas.

Secara teoritis, injeksi uap (steam injection) merupakan salah satu metode yang berpotensi meningkatkan kualitas pembakaran melalui beberapa mekanisme fisik dan kimia. Kehadiran uap air pada temperatur tinggi dapat meningkatkan turbulensi dan pencampuran antara gas volatil dengan oksigen sehingga mempercepat proses oksidasi. Selain itu, uap air dapat berpartisipasi dalam reaksi gasifikasi sekunder, seperti reaksi water-gas



dan reaksi water-gas shift



Reaksi ini akan menghasilkan gas mudah terbakar berupa hidrogen ( $\text{H}_2$ ) dan karbon monoksida (CO). Kehadiran hidrogen dapat meningkatkan kecepatan rambat api (flame propagation) dan memperbaiki kestabilan pembakaran, sedangkan proses pencampuran yang lebih baik dapat meningkatkan pembakaran gas volatil sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi termal sekaligus menurunkan pembentukan emisi akibat pembakaran tidak sempurna. Di sisi lain, efek pendinginan lokal (steam dilution) juga mampu mengendalikan temperatur puncak nyala sehingga distribusi temperatur di dalam ruang bakar menjadi lebih seragam.

Meskipun berbagai penelitian telah berhasil meningkatkan performa tungku biomassa melalui sistem forced-air, over-fire air, maupun jet flame, penelitian tersebut masih didominasi oleh penggunaan udara sebagai media injeksi dan hampir seluruhnya memerlukan sumber energi listrik eksternal. Hingga saat ini masih sangat sedikit penelitian yang mengembangkan sistem steam injection pada tungku biomassa skala kecil yang memanfaatkan panas hasil pembakaran itu sendiri sebagai sumber pembentukan uap tanpa tambahan energi eksternal. Selain itu, kajian mengenai penerapan sistem tersebut pada bahan bakar biomassa lokal, khususnya kayu cemara gunung (*Casuarina junghuhniana*), juga masih sangat terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (research gap) mengenai pemanfaatan injeksi uap berbasis panas internal sebagai metode peningkatan performa tungku biomassa yang sederhana, mandiri energi, dan sesuai untuk aplikasi di daerah pedesaan.

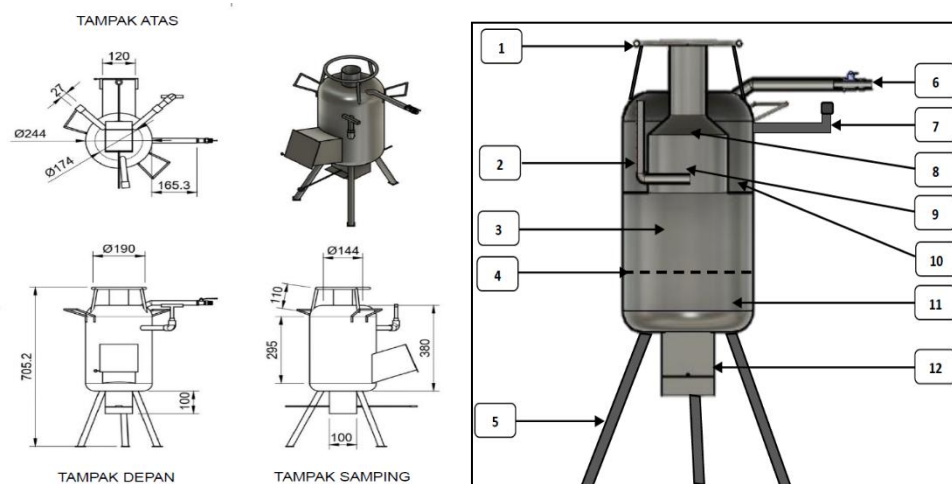
Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pengembangan sistem injeksi uap over-fire yang seluruh kebutuhan uapnya dihasilkan secara mandiri dari pemanfaatan panas internal proses pembakaran biomassa, sehingga tidak memerlukan blower maupun sumber energi eksternal. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan sistem forced-air. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi performa sistem menggunakan kayu cemara gunung sebagai biomassa lokal yang hingga saat ini belum banyak dilaporkan pada penelitian tungku biomassa. Kombinasi antara mekanisme pembangkitan uap mandiri dan pemanfaatan biomassa lokal diharapkan menghasilkan sistem pembakaran yang lebih sederhana, hemat energi, serta memiliki efisiensi dan karakteristik emisi yang lebih baik.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja tungku biomassa dengan sistem injeksi uap over-fire yang memanfaatkan panas internal hasil pembakaran menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung. Analisis dilakukan terhadap karakteristik pembakaran, efisiensi termal, serta karakteristik emisi untuk mengevaluasi efektivitas sistem injeksi uap dibandingkan proses pembakaran konvensional.

## METODE PENELITIAN

### Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis kinerja tungku biomassa dengan sistem injeksi uap *over-fire* menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah tungku biomassa tipe kompor roket. Uap dihasilkan dari pemanasan air dalam tangki injektor yang memanfaatkan panas dari proses pembakaran, kemudian diinjeksikan ke dalam saluran cerobong melalui lubang injektor. Gambar desain eksperimen ditunjukkan pada gambar 1.



**Gambar 1.** Desain Eksperimental

Keterangan:

- |                                  |                                        |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Dudukan untuk panci           | 7. Saluran masuk tangki injektor       |
| 2. Pipa saluran injektor uap     | 8. Saluran cerobong                    |
| 3. Ruang pembakaran              | 9. Lubang injektor uap                 |
| 4. Besi jaring untuk bahan bakar | 10. Tangki injektor                    |
| 5. Kaki tungku                   | 11. Ruang penampungan abu              |
| 6. Katup kontrol uap             | 12. Ventilasi / saluran pembuangan abu |

Variabel utama dalam penelitian ini adalah volume air injeksi yang divariasikan sebesar 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Variasi ini digunakan untuk mengkaji pengaruh jumlah uap terhadap karakteristik pembakaran, kinerja termal, dan emisi gas buang.

## Bahan dan Peralatan

Bahan bakar yang digunakan adalah kayu cemara gunung yang telah dikeringkan dan dipotong dengan ukuran seragam untuk memastikan konsistensi pembakaran. Pohon cemara gunung menghasilkan kayu bakar dengan kualitas yang sangat baik, mudah untuk terbakar walaupun dalam kondisi hijau dengan kadar abu rendah. Sangat baik bila dijadikan bahan bakar langsung maupun briket arang. Cemara gunung memiliki karakteristik yang mendukung sebagai bahan bakar biomassa, yaitu densitas udara kering sekitar 900–1000 kg/m<sup>3</sup> serta menghasilkan arang dengan nilai energi sekitar 34,5 MJ/kg, yang termasuk salah satu nilai tertinggi di antara spesies kayu bakar [12]. Air digunakan sebagai fluida kerja dalam sistem injeksi uap. Peralatan utama yang digunakan meliputi tungku biomassa injeksi uap, termokopel tipe-K untuk pengukuran temperatur pada beberapa titik (air dalam panci, ruang bakar, dan saluran cerobong), anemometer untuk mengukur kecepatan aliran udara, timbangan digital untuk mengukur massa bahan bakar dan residu, serta alat ukur emisi untuk mengukur konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub>.

## Prosedur Pengujian

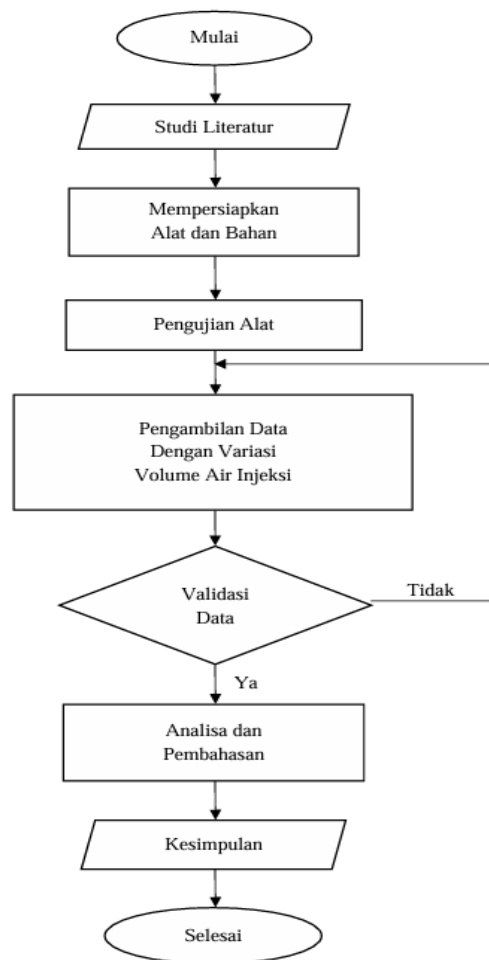
Pengujian dilakukan dalam dua tahap utama, yaitu pengujian kinerja termal dan pengujian emisi gas buang. Pada pengujian kinerja termal, metode *Water Boiling Test* (WBT) digunakan untuk mengevaluasi kemampuan tungku dalam memanaskan air. Sebanyak 2,5 liter air dipanaskan menggunakan bahan bakar biomassa yang telah ditimbang, dengan kondisi awal suhu lingkungan. Parameter yang diamati meliputi waktu pendidihan, perubahan temperatur air, temperatur ruang bakar, temperatur cerobong, serta kecepatan aliran udara. Pada pengujian emisi, pengukuran dilakukan menggunakan alat analisis gas untuk mengetahui konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> selama proses pembakaran berlangsung. Pengambilan data dilakukan secara kontinu hingga bahan bakar habis terbakar. Setiap variasi volume air injeksi diuji dengan kondisi operasi yang sama untuk memastikan validitas perbandingan hasil.

## Parameter Analisis

Kinerja tungku biomassa dianalisis berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu:

1. Laju konsumsi bahan bakar (*Fuel Consumption Rate*), yang menunjukkan jumlah bahan bakar yang digunakan per satuan waktu.
2. Daya termal, yang menggambarkan laju energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran
3. Konsumsi spesifik bahan bakar (*Specific Fuel Consumption*), yang menunjukkan efisiensi penggunaan bahan bakar terhadap output energi.
4. Emisi gas buang, khususnya konsentrasi karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sebagai indikator kualitas pembakaran.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi pengaruh variasi volume air injeksi terhadap performa tungku biomassa. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada gambar 2.

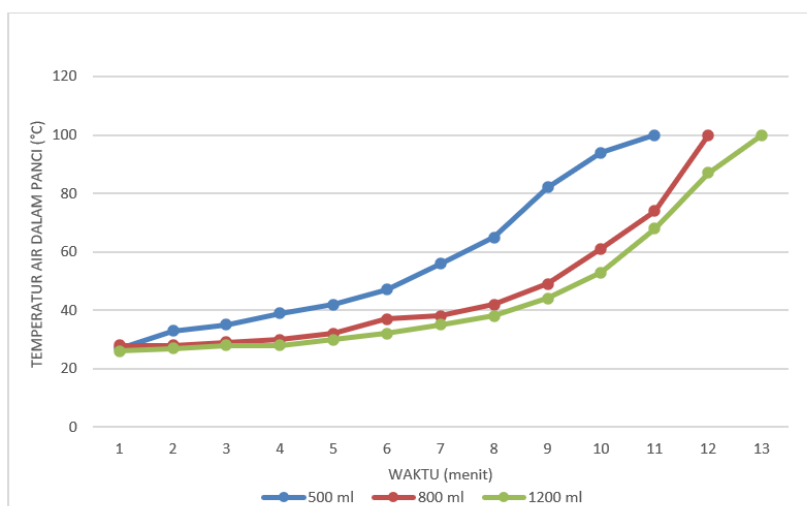


**Gambar 2.** Diagram alir penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kinerja Termal Tungku Biomassa

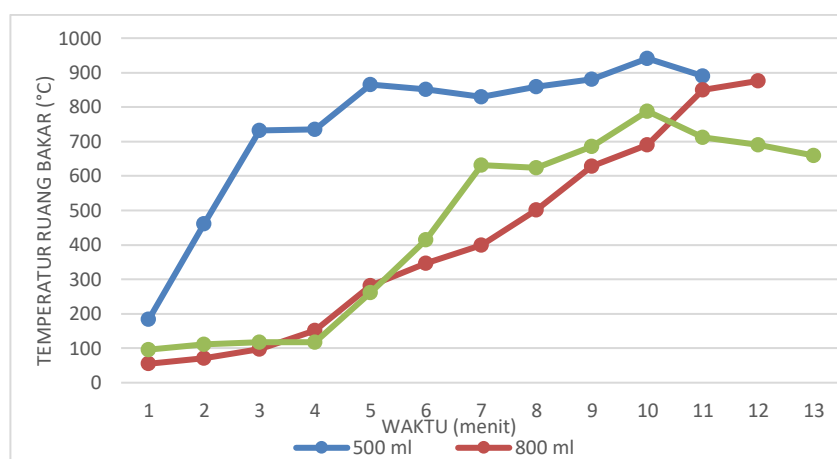
Pengujian pembakaran tungku adalah proses pengujian yang dilakukan dengan cara membakar biomassa untuk menganalisis dan mengetahui kinerja tungku biomassa dengan memvariasikan air injeksi di dalam tungku selama proses pembakaran berlangsung.



**Gambar 3.** Temperatur Air Dalam Panci Terhadap Waktu

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara waktu pemanasan dan temperatur air pada tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi mengalami peningkatan temperatur seiring bertambahnya waktu pemanasan. Variasi 500 ml menghasilkan kenaikan temperatur tercepat dengan titik didih tercapai pada menit ke-11, sedangkan variasi 800 ml dan 1200 ml masing-masing mencapai titik didih pada menit ke-12 dan ke-13. Semakin besar volume air injeksi, semakin besar energi panas yang digunakan untuk pembentukan uap sehingga laju pemanasan air menjadi lebih lambat.

Meskipun demikian, variasi 1200 ml menunjukkan pola kenaikan temperatur yang lebih stabil dibandingkan variasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan volume injeksi uap berkontribusi terhadap kestabilan pembakaran dan distribusi panas di dalam ruang bakar. Dengan demikian, terdapat *trade-off* antara kecepatan pemanasan dan kestabilan pembakaran, di mana volume injeksi yang lebih kecil menghasilkan pemanasan lebih cepat, sedangkan volume yang lebih besar cenderung meningkatkan stabilitas pembakaran dan efisiensi termal [14], [15].

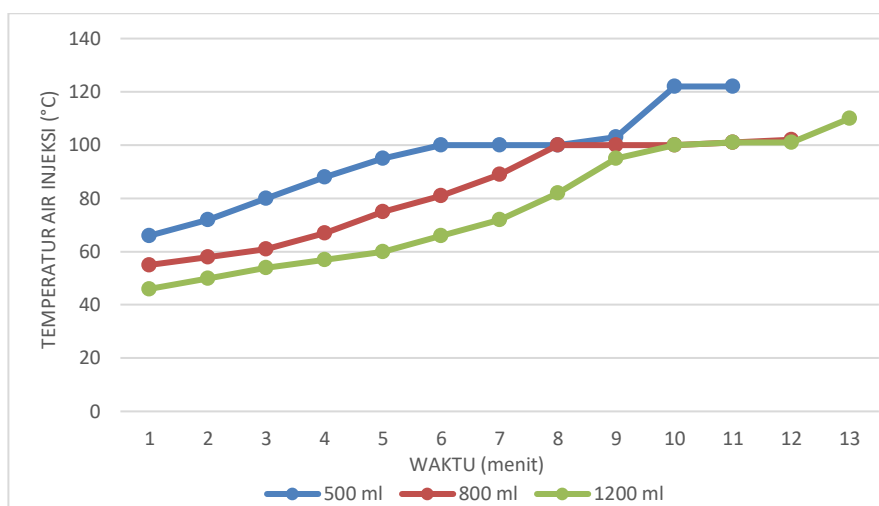


**Gambar 4.** Temperatur Ruang Bakar Terhadap Waktu

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara waktu dan temperatur ruang bakar pada tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan peningkatan temperatur seiring waktu, namun dengan karakteristik yang berbeda. Variasi 500 ml menghasilkan kenaikan temperatur paling cepat dengan temperatur ruang bakar mencapai lebih dari 700°C pada menit ke-3 dan stabil pada kisaran

800–950°C hingga akhir pengujian. Variasi 800 ml menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih bertahap dan mencapai kisaran 850–880°C pada menit ke-11 hingga ke-12. Sementara itu, variasi 1200 ml mengalami kenaikan temperatur paling lambat pada fase awal dan mencapai puncak sekitar 780°C pada menit ke-10 sebelum menurun secara bertahap.

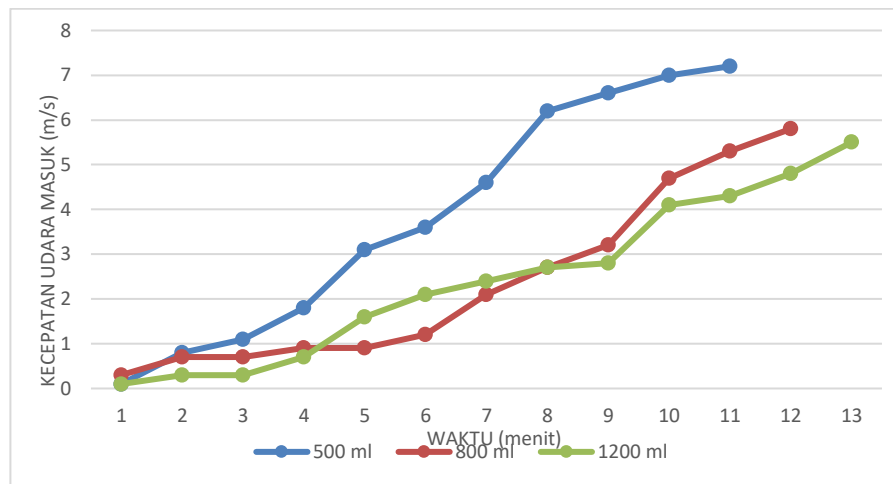
Perbedaan pola temperatur tersebut menunjukkan bahwa volume air injeksi memengaruhi intensitas dan kestabilan pembakaran. Semakin besar volume air injeksi, semakin besar energi panas yang digunakan untuk pembentukan uap sehingga temperatur puncak ruang bakar menjadi lebih rendah dan pembakaran berlangsung lebih terkendali. Variasi 1200 ml menunjukkan efek pendinginan parsial (*adiabatic cooling*) yang menghasilkan temperatur lebih stabil dibandingkan variasi lainnya. Dengan demikian, volume injeksi kecil cenderung menghasilkan pembakaran lebih cepat dan temperatur tinggi, sedangkan volume injeksi besar meningkatkan kestabilan proses pembakaran [16].



**Gambar 5.** Temperatur Air Injeksi Terhadap Waktu

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara waktu dan temperatur air injeksi pada tiga variasi volume air, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi mengalami peningkatan temperatur seiring waktu, yang menunjukkan bahwa panas hasil pembakaran biomassa dimanfaatkan untuk memanaskan air hingga menghasilkan uap. Variasi 500 ml menunjukkan kenaikan temperatur tercepat dengan titik didih tercapai pada menit ke-6 dan temperatur maksimum sekitar 120°C pada menit ke-10. Variasi 800 ml mencapai titik didih pada menit ke-8 dengan kenaikan temperatur yang lebih bertahap, sedangkan variasi 1200 ml mengalami kenaikan temperatur paling lambat dan mencapai titik didih pada menit ke-10 sebelum meningkat hingga sekitar 110°C pada menit ke-13.

Perbedaan laju kenaikan temperatur menunjukkan bahwa volume air injeksi berpengaruh terhadap proses pembentukan uap dalam sistem. Volume air yang lebih kecil memungkinkan pemanasan dan pembentukan uap berlangsung lebih cepat, sedangkan volume yang lebih besar menghasilkan pemanasan lebih lambat namun cenderung lebih stabil selama proses pembakaran. Dengan demikian, pengaturan volume air injeksi berperan penting dalam menentukan stabilitas suplai uap dan karakteristik pembakaran biomassa. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa volume air memengaruhi keseimbangan energi panas dan kestabilan distribusi temperatur pada sistem pembakaran biomassa [17].



**Gambar 6.** Kecepatan Udara Masuk Terhadap Waktu

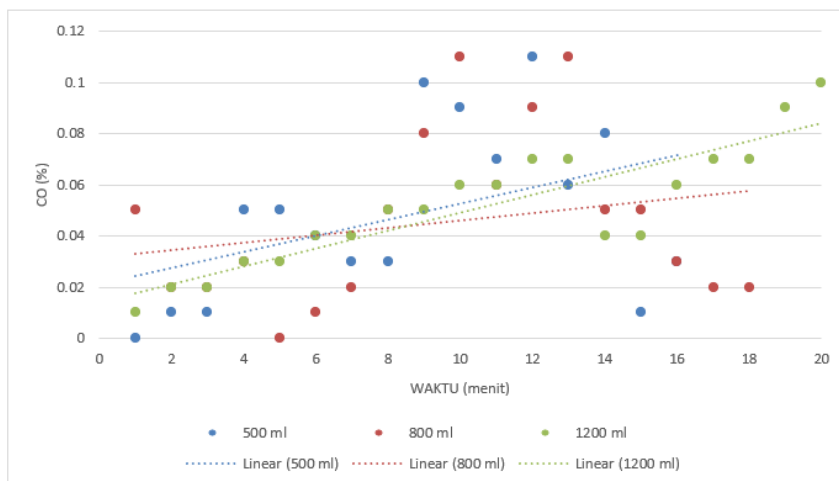
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara waktu terhadap kecepatan aliran udara masuk pada tungku biomassa untuk tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan tren peningkatan kecepatan aliran udara seiring bertambahnya waktu pembakaran. Pada variasi air injeksi 500 ml, kecepatan udara meningkat paling cepat dibandingkan variasi lainnya. Sejak menit awal, kecepatan udara meningkat signifikan dari sekitar 0,2 m/s hingga mencapai lebih dari 7 m/s pada menit ke-11. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung sangat intens, sehingga menghasilkan gaya dorong aliran (*draft*) yang lebih besar di dalam sistem tungku.

Pada variasi 800 ml, peningkatan kecepatan udara terjadi lebih bertahap. Kecepatan aliran udara meningkat secara kontinu hingga mencapai sekitar 5,8 m/s pada menit ke-12. Pola ini menunjukkan bahwa sebagian energi panas digunakan untuk proses pembentukan uap, sehingga intensitas pembakaran dan efek *draft* yang dihasilkan tidak secepat pada variasi 500 ml. Sementara itu, pada variasi 1200 ml, peningkatan kecepatan udara merupakan yang paling lambat pada fase awal, namun menunjukkan tren kenaikan yang stabil hingga mencapai sekitar 5,5 m/s pada menit ke-13. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun pembentukan uap berlangsung lebih lambat, suplai uap yang lebih besar mampu menjaga kestabilan aliran udara dalam sistem.

Perbedaan karakteristik ini menunjukkan bahwa volume air injeksi berpengaruh terhadap dinamika aliran udara dalam tungku. Volume air yang lebih kecil menghasilkan pembakaran yang lebih cepat dan meningkatkan efek *draft* secara signifikan, sedangkan volume yang lebih besar cenderung menghasilkan aliran udara yang lebih stabil akibat kontribusi uap terhadap peningkatan tekanan dan turbulensi dalam saluran pembakaran.

Pembentukan gas panas dan uap selama pembakaran biomassa mempengaruhi pola aliran udara di dalam tungku. Sistem dengan proses pembakaran lebih stabil menghasilkan distribusi udara yang lebih merata sehingga pembakaran berlangsung lebih efisien dan temperatur ruang bakar lebih terkendali [18].

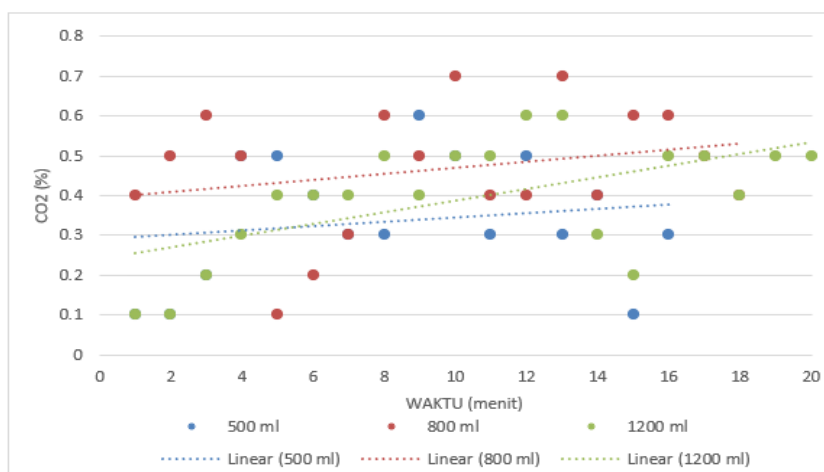
## Analisis Emisi Gas Buang



**Gambar 7.** Emisi Karbon Monoksida (CO) Terhadap Waktu

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara waktu pembakaran dan konsentrasi emisi karbon monoksida (CO) pada tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan kecenderungan peningkatan konsentrasi CO seiring bertambahnya waktu pembakaran, namun dengan pola fluktuasi yang berbeda. Variasi 500 ml menunjukkan fluktuasi CO paling besar dengan konsentrasi mencapai sekitar 0,10–0,11% pada menit ke-9 hingga ke-12. Variasi 800 ml mengalami peningkatan CO yang lebih bertahap dengan nilai puncak sekitar 0,11%, sedangkan variasi 1200 ml menunjukkan peningkatan CO yang lebih stabil dan terkendali hingga mencapai sekitar 0,10% pada akhir pembakaran.

Perbedaan pola emisi tersebut menunjukkan bahwa volume air injeksi memengaruhi kestabilan proses pembakaran. Variasi 1200 ml menghasilkan tren emisi CO yang lebih konsisten, yang mengindikasikan pembakaran berlangsung lebih stabil akibat peningkatan pencampuran dan distribusi panas di dalam ruang bakar. Sebaliknya, variasi 500 ml menunjukkan fluktuasi emisi yang lebih tinggi akibat kondisi pembakaran yang kurang stabil. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan temperatur dan distribusi udara berpengaruh terhadap pembentukan emisi CO, di mana fluktuasi temperatur yang tinggi cenderung menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatkan konsentrasi CO [19].



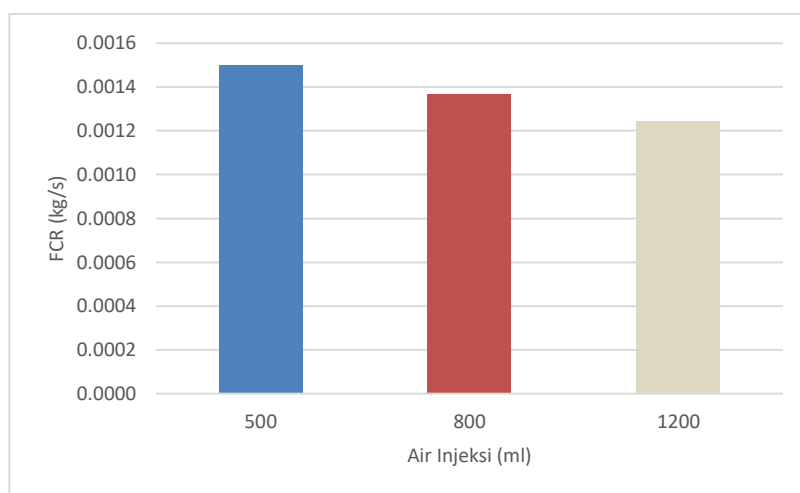
**Gambar 8.** Emisi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) Terhadap Waktu

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara waktu pembakaran dan konsentrasi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

pada tiga variasi volume air injeksi, yaitu 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan kecenderungan peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> seiring bertambahnya waktu pembakaran, yang mengindikasikan peningkatan proses oksidasi karbon selama pembakaran berlangsung. Variasi 500 ml menghasilkan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang relatif rendah dan stabil pada kisaran 0,3–0,6%, sedangkan variasi 800 ml menunjukkan peningkatan konsentrasi yang lebih tinggi hingga sekitar 0,7%. Variasi 1200 ml memperlihatkan tren peningkatan CO<sub>2</sub> yang paling stabil dan konsisten hingga mencapai kisaran 0,5–0,6% pada akhir pembakaran.

Perbedaan pola emisi CO<sub>2</sub> menunjukkan bahwa peningkatan volume air injeksi berkontribusi terhadap kestabilan dan kualitas pembakaran. Variasi 1200 ml menghasilkan peningkatan CO<sub>2</sub> yang lebih konsisten disertai fluktuasi CO yang lebih rendah, yang mengindikasikan proses pembakaran berlangsung lebih sempurna. Kondisi ini menunjukkan bahwa injeksi uap berperan dalam meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara serta menjaga kestabilan termal di dalam ruang bakar. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang stabil dapat digunakan sebagai indikator peningkatan efisiensi dan kualitas pembakaran biomassa [20].

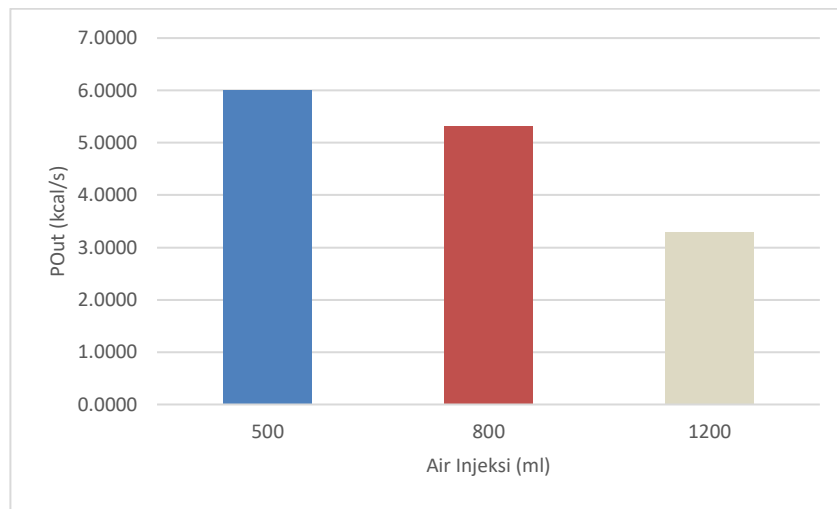
### Kinerja Pembakaran Bahan Bakar Cemara Gunung



**Gambar 9.** Laju Konsumsi Bahan Bakar Terhadap Variasi Air Injeksi

Gambar 9 menunjukkan pengaruh variasi volume air injeksi terhadap laju konsumsi bahan bakar (*Fuel Consumption Rate/FCR*) pada tungku biomassa. Secara umum, nilai FCR menurun seiring dengan peningkatan volume air injeksi. Variasi 500 ml menghasilkan nilai FCR tertinggi, yaitu sekitar 0,0015 kg/s, yang menunjukkan proses pembakaran berlangsung lebih cepat dan intens sehingga konsumsi bahan bakar lebih besar. Pada variasi 800 ml, nilai FCR menurun menjadi sekitar 0,00137 kg/s, sedangkan variasi 1200 ml menghasilkan nilai FCR terendah, yaitu sekitar 0,00125 kg/s.

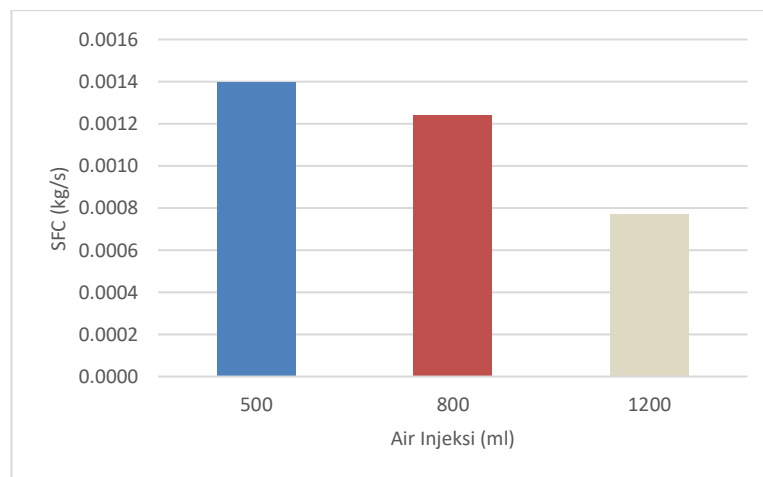
Penurunan nilai FCR menunjukkan bahwa peningkatan volume air injeksi berkontribusi terhadap pembakaran yang lebih efisien. Injeksi uap dalam jumlah lebih besar membantu meningkatkan distribusi panas dan pencampuran bahan bakar dengan udara sehingga energi hasil pembakaran dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembakaran yang lebih terkendali cenderung menghasilkan konsumsi bahan bakar lebih rendah dibandingkan pembakaran yang terlalu intensif, yang umumnya menyebabkan kehilangan panas lebih besar dan efisiensi energi menurun [21].



**Gambar 10.** Daya Termal Terhadap Variasi Air Injeksi

Gambar 10 menunjukkan pengaruh variasi volume air injeksi terhadap daya termal ( $P_{out}$ ) pada tungku biomassa. Secara umum, nilai daya termal menurun seiring dengan peningkatan volume air injeksi. Variasi 500 ml menghasilkan daya termal tertinggi, yaitu sekitar 6,0 kcal/s, yang menunjukkan bahwa sebagian besar energi pembakaran langsung ditransfer sebagai output panas. Pada variasi 800 ml, daya termal menurun menjadi sekitar 5,3 kcal/s, sedangkan variasi 1200 ml menghasilkan daya termal terendah, yaitu sekitar 3,3 kcal/s.

Penurunan daya termal menunjukkan bahwa sebagian energi pembakaran digunakan untuk proses pemanasan air injektor dan pembentukan uap. Meskipun demikian, kondisi ini tidak menunjukkan penurunan kinerja sistem secara keseluruhan, karena distribusi energi ke sistem injeksi uap berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran dan kualitas emisi. Variasi volume air injeksi yang lebih besar cenderung menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan efisien melalui peningkatan homogenitas pencampuran bahan bakar dan udara, meskipun output panas langsung menjadi lebih rendah [22].



**Gambar 11.** Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Terhadap Variasi Air Injeksi

Gambar 11 menunjukkan pengaruh variasi volume air injeksi terhadap konsumsi spesifik bahan bakar (*Specific Fuel Consumption*/SFC) pada tungku biomassa. Secara umum, nilai SFC menurun seiring dengan peningkatan volume air injeksi. Variasi 500 ml menghasilkan nilai SFC tertinggi, yaitu sekitar 0,0014 kg/s, yang menunjukkan kebutuhan bahan bakar relatif lebih besar untuk menghasilkan energi. Pada variasi 800 ml, nilai SFC menurun menjadi sekitar 0,00125 kg/s, sedangkan variasi 1200 ml menghasilkan nilai SFC terendah, yaitu sekitar 0,00078 kg/s.

Penurunan nilai SFC menunjukkan bahwa peningkatan volume air injeksi mampu meningkatkan efisiensi

penggunaan bahan bakar. Injeksi uap dalam jumlah lebih besar membantu memperbaiki pencampuran bahan bakar dan udara serta menghasilkan distribusi panas yang lebih merata, sehingga energi pembakaran dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Nilai SFC yang lebih rendah pada variasi 1200 ml mengindikasikan bahwa sistem pembakaran bekerja lebih efisien dengan kehilangan energi akibat pembakaran tidak sempurna dan kehilangan panas yang lebih kecil [23].

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem injeksi uap over-fire menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran, kinerja termal, dan emisi gas buang. Variasi volume air injeksi 1200 ml memberikan kinerja terbaik dengan laju konsumsi bahan bakar sebesar 0,0012 kg/s, daya termal 32,977 kcal/s, dan efisiensi termal mencapai 51%. Selain itu, kondisi ini menghasilkan emisi CO yang rendah dan CO<sub>2</sub> yang lebih stabil, yang mengindikasikan pembakaran lebih sempurna. Secara keseluruhan, sistem injeksi uap berbasis panas internal terbukti efektif meningkatkan efisiensi pembakaran tanpa memerlukan energi eksternal, sehingga berpotensi menjadi teknologi sederhana dan berkelanjutan untuk pemanfaatan biomassa lokal, khususnya kayu cemara gunung.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Murdiyati, S., Herat, S., Purwanto, W. W., & Kaparaju, "Bioenergy potential for heat and power generation in Indonesia based on biomass resources assessment: Analysis up to 2060," *Biomass and Bioenergy*, vol. 214, p. 109447, 2026.
- [2] S. M. Gani, A., Munawar, E., Mamat, R., & Rosdi, "Investigation of the potential biomass waste source for biocoke production in Indonesia: A review," *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 2417-2438., 2023.
- [3] O. Chowdhury, P., Mahi, N. A., Yeassin, R., Chowdhury, N. U. R., & Farrok, "Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges.," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 25, p. 100889, 2025.
- [4] M. Nurdin, M. F., Santoso, H., & Dahlan, "Analisis Nilai Kalor pada Empat Sisi Dinding Kompor Biomassa," *J. Energy, Mater. Manuf. Technol.*, vol. 2(01), pp. 47–51.
- [5] T. (2025). Cansee, S., Saenkhram, S., Promtow, W., Hu, S., & Kanasri, "Performance optimization of natural updraft gasifier stoves: Impact of air hole configuration and biomass fuel characteristics on combustion efficiency," *Energy Nexus*, p. 100480, 2025.
- [6] G. Jiang, K., Xie, Y., Huang, T., Zhang, Y., Luo, Z., Xiao, K., & Shen, "Exploring Fuel-Stove and Operational Impacts on Fugitive Emissions from Indoor Biomass Combustion," *Environ. Pollut.*, p. 128179, 2026.
- [7] L. Yue, K., Yan, Y., Li, Z., Niu, Y., Dong, J., Zhou, Y., & Peng, "Volatile organic compounds emission characteristics and factors from stage-dependent combustion in typical biomass stoves in northern China: Field measurements and environmental implications.," *Environ. Pollut.*, vol. 372, p. 126008, 2025.
- [8] M. Rebyrk, A., Kozyatnyk, I., & Njenga, "Emission of volatile organic compounds during open fire cooking with wood biomass: traditional three-stone open fire vs. gasifier cooking stove in rural Kenya," *Sci. Total Environ.*, vol. 934, p. 173183, 2024.
- [9] D. Barbour, M., Udesen, D., Bentson, S., Pundle, A., Tackman, C., Evitt, D., & Lieberman, "Development of wood-burning rocket cookstove with forced air-injection," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 65, pp. 12–24, 2021.
- [10] N. Bentson, S., Evitt, D., Still, D., Lieberman, D., & MacCarty, "Retrofitting stoves with forced jets of primary air improves speed, emissions, and efficiency: Evidence from six types of biomass cookstoves," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 71, pp. 104–117, 2022.
- [11] Y. Gao, W., Hu, Y., Yan, R., Yan, W., Yang, M., Miao, Q., & Wang, "Comprehensive review on thermal performance enhancement of domestic gas stoves," *ACS Omega*, vol. 8, no. 30, pp. 26663–26684, 2023.
- [12] F. Hanum, I., & V.D Maesen, L.J.G. (Eds.). *Plant Resources of South-East Asia (PROSEA): Auxiliary Plants*. PROSEA Foundation.
- [13] G. Mancini, M., Duca, D., & Toscano, "Laboratory customized online measurements for the prediction of the key-parameters of biomass quality control," *J. near infrared Spectrosc.*, vol. 27, no. 1, pp. 15–25, 2019.
- [14] S. Shinwari, "Investigation of fuel and water injection in gas turbine combustion using CFD simulation," 2023.
- [15] M. Ali, U., Palma, C. F., Hughes, K. J., Ingham, D. B., Ma, L., & Pourkashanian, "Thermodynamic analysis and process system comparison of the exhaust gas recirculated, steam injected and humidified micro gas turbine. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air," *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 56673, p. V003T06A011, 2015.

- [16] P. A. ( Bhattacharya, S. C., & Salam, "Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. Biomass and bioenergy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 22, no. 4, pp. 305–317, 2022.
- [17] A. T. Belonio, *Rice husk gas stove handbook*. 2005.
- [18] U. Mukunda, H. S., Dasappa, S., Paul, P. J., Rajan, N. K. S., Yagnaraman, M., Kumar, D. R., & Srinivasa, "Gasifier stoves — Science, technology and field outreach," *Curr. Sci.*, vol. 98, no. 5, pp. 627–638, 2010.
- [19] S. A. Zhang, J., Smith, K. R., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., Liu, P., Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., & Thorneloe, "Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: A database for emission factors.," *Atmos. Environ.*, vol. 34, no. 26, pp. 4537–4549, 2000.
- [20] M. Siegmund, T., Gollmer, C., Scherzinger, M., & Kaltschmitt, "A review of CO emissions during solid biofuel combustion— Formation mechanisms and fuel-related reduction measures.," *J. Energy Institute*, vol. 116, 10176, p. 101762, 2024.
- [21] C. MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., & Roden, "(2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves.," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, 2008.
- [22] P. Kumar, M., Patel, S. K., & Kumar, "Experimental investigations on thermal performance of open top gasifier cook stove. ," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 5, pp. 927–932, 2010.
- [23] M. D. Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, "Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards.," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 19, pp. 10827–10834., 2012.