

Kaji Eksperimental Efek Kecepatan Sirkulasi Udara Dan Waktu Pembakaran Terhadap Performa Pembakaran Kompor Bio Massa

Nur Hasim^{1*}, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³, Suheri Suheri⁴

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra, Langsa, Aceh

Email : haziempkb@gmail.com

Abstract: Indonesia is currently facing a significant challenge in managing its growing energy demands, driven by rapid population growth and accelerating economic development. This rising dependency on fossil-based fuels if left unaddressed poses serious environmental and social risks, including pollution, greenhouse gas emissions, and long-term energy insecurity. As a result, biomass has emerged as one of the most promising renewable energy alternatives, particularly for household and community cooking needs. This study investigates the combustion performance of biomass-based biopellets, formulated from a balanced blend of sawdust waste and rice bran, as the primary fuel source. Combustion experiments were carried out inside a purpose-built biomass stove with dimensions of 520 × 250 × 190 mm. To evaluate how airflow intensity and burning duration influence thermal output, three air velocity settings were applied 3 m/s, 6 m/s, and 9 m/s delivered through a controlled blower system. Combustion duration was systematically extended across ten intervals ranging from 60 seconds up to 600 seconds, allowing a detailed characterization of both combustion and thermal efficiency at each stage. Experimental results revealed that the highest thermal efficiency was consistently achieved at an air velocity of 9 m/s combined with a combustion duration of 600 seconds, yielding 46.349% for biopellets and 41.381% for wood. These figures demonstrate a clear positive relationship between increased airflow and prolonged burning time with overall energy conversion performance. The outcomes of this research are intended to serve as a practical engineering reference for designing next-generation biomass stoves that are both energy-efficient and environmentally responsible. Specifically, an air velocity of 9 m/s and a 600-second combustion window are strongly recommended as the benchmark operating parameters for optimal biomass stove performance in real-world applications.

Keywords: biomass, biopellets, wood stove, temperature, thermal.

Diterima: May 18, 2026
Direvisi: May 26, 2026
Diterima: May 29, 2026
Diterbitkan: July 2, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Abstrak: Indonesia saat ini menghadapi tantangan serius dalam mengelola kebutuhan energinya yang terus meningkat, yang dipicu oleh pertumbuhan penduduk yang pesat dan perkembangan ekonomi yang semakin dinamis. Tanpa langkah-langkah yang memadai, ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil berisiko menyebabkan konsekuensi negatif yang signifikan, mulai dari pencemaran lingkungan dan peningkatan emisi gas rumah kaca hingga ancaman terhadap keamanan energi jangka panjang. Inilah sebabnya mengapa biomassa muncul sebagai salah satu alternatif energi terbarukan yang paling menjanjikan., khususnya untuk memenuhi kebutuhan memasak masyarakat sehari-hari. Penelitian ini mengkaji performa pembakaran biopellet berbasis biomassa yang diformulasikan dari campuran seimbang antara limbah serbuk gergaji dan dedak padi sebagai bahan bakar utama. Pengujian pembakaran dilakukan pada kompor biomassa yang dirancang khusus dengan dimensi 520 × 250 × 190 mm. Untuk mengevaluasi pengaruh intensitas aliran udara dan durasi pembakaran terhadap keluaran termal, tiga pengaturan kecepatan udara diterapkan, yaitu 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s yang disalurkan melalui sistem blower yang terkontrol. Durasi pembakaran secara bertahap diperpanjang dalam sepuluh interval mulai dari 60 detik hingga 600 detik, sehingga memungkinkan karakterisasi mendetail terhadap efisiensi pembakaran dan efisiensi termal pada setiap tahapan. Hasil eksperimen mengungkapkan bahwa efisiensi termal tertinggi secara konsisten diperoleh pada kecepatan udara 9 m/s dikombinasikan dengan durasi pembakaran 600 detik, menghasilkan nilai 46,349% untuk biopellet dan 41,381% untuk kayu. Angka-angka ini membuktikan adanya hubungan positif yang nyata antara

peningkatan aliran udara dan perpanjangan waktu pembakaran terhadap performa konversi energi secara keseluruhan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan rekayasa praktis dalam merancang kompor biomassa generasi berikutnya yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Secara khusus, kecepatan udara 9 m/s dan durasi pembakaran 600 detik sangat direkomendasikan sebagai parameter operasional acuan untuk performa kompor biomassa yang optimal dalam penerapan nyata di lapangan.

Kata kunci: biomassa,biopellet,kayu,kompor,temperatur,termal

1. Pendahuluan

Laju pertumbuhan penduduk dan kemajuan perekonomian di Indonesia berlangsung begitu cepat sehingga kebutuhan akan energi dan bahan bakar pun turut melonjak tajam [1]. Penggunaan bahan bakar berbasis fosil yang tidak terkendali untuk menopang berbagai aktivitas masyarakat sehari-hari berpotensi menimbulkan dampak buruk yang serius bagi lingkungan maupun kehidupan manusia [2]. Dampak yang ditimbulkan antara lain mencakup degradasi kualitas udara, fenomena pemanasan global, hingga berbagai gangguan pada kesehatan masyarakat [3]. Sebagai upaya mengatasi persoalan tersebut, pengembangan energi berbasis sumber terbarukan dinilai sebagai langkah strategis yang perlu diprioritaskan, dan biomassa hadir sebagai salah satu opsi yang paling layak untuk dikembangkan [4]. Biomassa sendiri merupakan material organik yang dapat diperbarui, bersumber dari sisa-sisa organisme tumbuhan maupun hewan [5].

Keunggulan biomassa sebagai sumber energi terbarukan terletak pada kemampuannya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca, serta menawarkan biaya operasional yang jauh lebih ekonomis [6]. Biomassa dinilai memiliki peran yang sangat vital sebagai bahan bakar alternatif yang bersih dan terjangkau, khususnya untuk keperluan memasak dengan menghasilkan panas secara efisien [7]. Lebih dari itu, biomassa berkontribusi nyata dalam mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap bahan bakar gas maupun minyak, sekaligus menjadi solusi energi ramah lingkungan yang relevan, terutama bagi komunitas di kawasan perdesaan [8].

Kompor biomassa tidak semata-mata bernilai dari sisi teknis, tetapi juga membawa dampak sosial dan ekonomi yang cukup besar, terutama bagi warga di kawasan pedesaan negara berkembang. Penggunaan bahan bakar berbasis fosil seperti LPG dan minyak tanah memberatkan keuangan rumah tangga, khususnya keluarga kurang mampu yang harus mengalokasikan porsi besar penghasilannya hanya untuk keperluan memasak sehari-hari. Dengan beralih ke kompor biomassa yang menggunakan limbah pertanian maupun kehutanan sebagai sumber energi, pengeluaran rumah tangga dapat dipangkas secara signifikan, sekaligus memberdayakan komunitas lokal untuk mengelola kebutuhan energinya secara lebih mandiri.

Lebih dari itu, penggunaan teknologi kompor biomassa yang efisien turut berkontribusi dalam menggerakkan ekonomi mikro, karena penghematan pada sektor bahan bakar memberi ruang bagi rumah tangga untuk mengalihkan sumber daya finansialnya ke kebutuhan yang lebih produktif. Secara perbandingan, kompor biomassa dengan desain yang telah disempurnakan terbukti mencapai rata-rata efisiensi termal sekitar 31%, angka ini jauh lebih unggul dibandingkan kompor tradisional berbasis tiga batu yang hanya menghasilkan efisiensi sekitar 13%. Konsumsi bahan bakarnya pun lebih irit, yakni rata-rata 140,53 gram per liter air yang dipanaskan, dibanding kompor tradisional yang membutuhkan hingga 214,8 gram per liter air [9].

Agar pemanfaatan biomassa dapat berjalan secara maksimal, dibutuhkan teknologi tepat guna yang mampu mengolahnya secara efektif, salah satunya adalah kompor biomassa [10]. Kompor biomassa diyakini sebagai instrumen yang sangat fungsional dalam menghadapi ancaman krisis energi sekaligus menjadi simbol nyata dari kemandirian energi masyarakat [11]. Kompor biomassa terkini memperlihatkan performa yang jauh lebih baik dibandingkan kompor berbahan bakar fosil, baik dari aspek efisiensi termal maupun dampaknya terhadap lingkungan. Hasil kajian secara numerik dan eksperimental pada kompor biomassa tipe *natural draft* yang telah dioptimalkan menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi yang mampu

dicapai berada di angka 42%, dengan kapasitas daya sebesar 8,25 kW dan efisiensi keseluruhan mencapai 41,5% capaian yang melampaui standar umum kompor biomassa komersial yang beredar di pasaran.

Dari sisi emisi, studi yang sama mencatat bahwa kadar CO dan CO₂ yang dihasilkan hanya sebesar 23 ppm dan 940 ppm, sementara konsentrasi partikulat PM_{2,5} rata-rata tercatat di angka 20 µg/m³ (Hayyat et al., 2024). Nilai-nilai tersebut jauh di bawah tingkat emisi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil maupun kompor kayu tradisional tanpa kendali aliran udara. Fakta ini menegaskan bahwa kompor biomassa dengan rancangan yang matang dan pengendalian suplai udara yang cermat bukan sekadar pilihan alternatif, melainkan telah berkembang menjadi solusi memasak yang secara teknis lebih efisien sekaligus lebih bersahabat dengan lingkungan dibandingkan kompor konvensional yang masih umum digunakan saat ini.

Lebih jauh lagi, kompor biomassa juga memiliki potensi untuk difungsikan sebagai sumber pembangkit energi listrik, hal ini sangat relevan untuk keberlanjutan usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) di berbagai wilayah [12]. Berbagai kajian ilmiah telah dilaksanakan untuk menelaah kinerja serta tingkat efisiensi dari kompor biomassa secara lebih komprehensif [13]. Salah satu penelitian merancang sistem *forced air* pada kompor biomassa berbahan bakar biopellet dengan variasi kecepatan udara 5 m/s dan 8 m/s guna memperoleh desain kompor yang paling optimal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu pembakaran biopellet mampu mencapai puncaknya di angka 860°C dengan konsumsi bahan bakar sebesar 220 gram dan waktu pendidihan air hanya 10 menit. Sementara itu, bahan bakar kayu hanya mampu mencapai suhu maksimum 613°C dengan konsumsi 642 gram dan membutuhkan waktu pendidihan selama 17 menit, membuktikan bahwa biopellet memiliki waktu pemanasan yang jauh lebih singkat dibandingkan kayu [1]. Pada penelitian lain, variasi kecepatan aliran udara 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s diterapkan pada tumpukan biomassa dengan campuran abu 50% biopellet kayu jati dan 50% rebung petung. Hasil menunjukkan bahwa kondisi paling optimal dicapai pada peningkatan kecepatan angin 4 m/s, menghasilkan efisiensi termal tertinggi sebesar 29,17%, konsumsi bahan bakar spesifik terendah sebesar 2.038 kg/jam, dan tingkat emisi CO₂ sebesar 22 ppm.

Studi lain mengembangkan kompor biomassa tipe *continue* berdimensi 49 cm dengan bobot 50 kg yang kemudian dibandingkan performanya dengan kompor konvensional untuk mengukur efisiensi pembakarannya. Variabel yang diuji meliputi durasi pembakaran 2,5 jam dan 3,5 jam, serta berat bahan bakar masing-masing 13 kg dan 20 kg. Temuan riset ini mengungkapkan bahwa kompor biomassa mampu melampaui kompor konvensional dengan peningkatan efisiensi sebesar 28,5% [14]. Penelitian berikutnya merancang kompor biomassa berbahan bakar kayu dengan variasi penggunaan 1 kg dan 2 kg untuk mengevaluasi efektivitas alat tersebut. Diperoleh hasil bahwa nyala api efektif berlangsung selama 19,8 menit dalam total waktu operasi 47 menit, menghasilkan daya sebesar 1,37 kW dan 14,6 kW [7]. Kajian lainnya mengembangkan perangkat pembangkit listrik berbasis *thermoelectric* yang memanfaatkan panas buang kompor biomassa, dengan memvariasikan jumlah lubang udara sebanyak 20, 27, dan 34 lubang berdiameter 0,008 m, serta 34 lubang orisinal berdiameter 0,006 m yang dirangkai secara seri. Modul TEG SP1848-27145 yang dipasang pada dinding kompor dengan 34 lubang modifikasi terbukti menghasilkan daya tertinggi sebesar 1,242 Watt, diikuti konfigurasi 34 lubang asli sebesar 0,874 Watt, 27 lubang sebesar 0,518 Watt, dan 20 lubang sebesar 0,306 Watt [2]. Eksperimen lainnya menguji pembakaran campuran biomassa serbuk kayu dengan variasi komposisi 20%, 30%, 40%, dan 50% untuk menganalisis daya yang dihasilkan. Diperoleh hasil bahwa *Fuel Consumption Rate* (FCR) tertinggi sebesar 2,31 kg/jam menghasilkan daya bersih (*P_{out}*) sebesar 0,533 kW, daya pembakaran (*P_{in}*) sebesar 5,31 kW, kehilangan daya (*P_{loss}*) sebesar 5,02 kW, dengan efisiensi tertinggi mencapai 66% [3].

Desain kompor biomassa yang menggunakan kayu dan serbuk gergaji juga telah dikembangkan dengan berat bahan bakar 1 kg, 2 kg, dan 3 kg untuk mengevaluasi efisiensi termalnya. Pengujian dengan 2 kg bahan bakar menghasilkan nyala api yang efisien selama 19,8 menit dengan total waktu operasi 47 menit, dengan efisiensi yang meningkat hingga 29,17% [7]. Sementara itu, perubahan kecepatan aliran udara sebesar 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dianalisis pada kompor biomassa T-LUD yang menggunakan campuran 50% pelet kayu jati dan 50% serpihan bambu, dengan kondisi optimal diperoleh pada kecepatan 4 m/s yang menghasilkan efisiensi termal tertinggi, yaitu 29, 7%. [6]. Hubungan antara pasokan

udara dan efisiensi pembakaran biomassa terbukti sangat erat dan bersifat proporsional hingga batas tertentu [15].

Pengendalian aliran udara yang presisi sangat diperlukan guna memastikan seluruh unsur karbon dan hidrogen dalam bahan organik dapat terkonversi secara optimal menjadi energi panas [1]. Metode *Water Boiling Test* (WBT) digunakan sebagai instrumen standar untuk mengoptimalkan pengukuran tersebut [1]. WBT merupakan metode yang telah diakui secara luas untuk mengukur efektivitas termal serta performa keseluruhan kompor melalui proses pemanasan air, dengan menggunakan formula efisiensi termal (η) yang membandingkan energi yang berhasil diserap oleh air terhadap total energi yang dilepaskan oleh bahan bakar [1], [3].

Penelitian-penelitian sebelumnya sebagian besar berfokus pada variasi massa bahan bakar biomassa, rentang durasi pembakaran, serta jenis kompor biomassa yang digunakan. Namun demikian, variabel kecepatan aliran udara sebagai faktor penentu efisiensi masih jarang menjadi fokus utama dalam studi tentang kompor biomassa. Penelitian yang secara khusus membahas profil emisi gas buang mencakup kadar CO, CO₂, serta partikel halus PM_{2,5} dari kompor biomassa bersistem udara paksa (*forced air*) masih sangat jarang ditemukan dalam literatur ilmiah yang tersedia saat ini. Padahal, data emisi merupakan tolak ukur krusial dalam menilai sejauh mana kualitas pembakaran berlangsung serta seberapa besar dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh suatu sistem kompor secara keseluruhan. Minimnya data emisi yang memadai dalam sebagian besar penelitian kompor biomassa menciptakan kesenjangan ilmiah yang mendasak untuk segera diisi, mengingat dimensi keberlanjutan lingkungan tidak bisa dilepaskan begitu saja dari penilaian performa teknis kompor itu sendiri.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengeksplorasi pengaruh variasi kecepatan aliran udara sebesar 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s terhadap peningkatan pembakaran dan efisiensi termal. Selain itu, variasi durasi pembakaran berkisar dari 60 detik, 120 detik, 180 detik, 240 detik, 300 detik, 360 detik, 420 detik, 480 detik, 540 detik, hingga 600 detik, turut dikarakterisasi untuk menghasilkan data yang lebih komprehensif. Biopellet yang digunakan dalam penelitian ini diformulasikan dari campuran seimbang antara limbah serbuk gergaji dan dedak padi, dengan tujuan memanfaatkan limbah agroindustri tersebut agar tidak terbuang sia-sia. Pemilihan kedua bahan baku ini didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah, harganya yang terjangkau, serta potensinya yang tinggi sebagai sumber energi terbarukan yang bernilai. Diharapkan, temuan dari penelitian ini kelak dapat dijadikan referensi ilmiah yang aplikatif dan diimplementasikan secara langsung dalam praktik di lapangan.

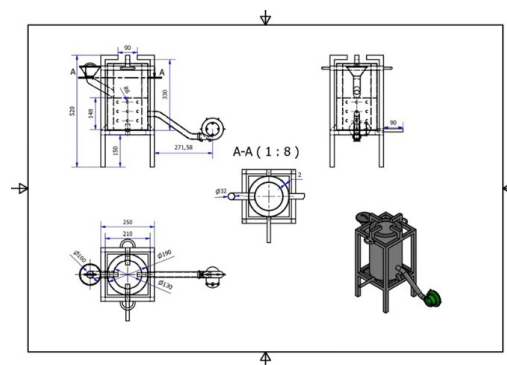
2. Metode

2.1 Model Fisik

Desain kompor biomassa yang menjadi objek dalam penelitian ini divisualisasikan pada Gambar 1, yang menampilkan konstruksi alat dari empat sudut pandang berbeda, yakni tampak samping, tampak depan, tampak atas, serta tampilan tiga dimensi (3-D) lengkap dengan spesifikasi ukurannya. Seluruh proses perancangan dan pemodelan geometri dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak desain teknik SolidWorks. Material yang dipilih sebagai bahan konstruksi utama adalah pelat baja ASTM A36 setebal 1,5 mm. Kompor biomassa ini memiliki dimensi keseluruhan sebesar 520 × 250 × 190 mm dan beroperasi berdasarkan prinsip pembakaran biopellet yang efisien, didukung oleh suplai udara terstruktur yang dialirkan melalui blower dengan tiga kecepatan, yaitu 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s, guna menjamin keberlangsungan proses pembakaran yang optimal. Penetapan tiga variasi kecepatan aliran udara pada 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s dalam penelitian ini dilandasi oleh dua pertimbangan utama, yaitu kapasitas operasional blower yang digunakan serta acuan dari penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan. Namun demikian, perlu diakui bahwa penambahan titik variasi di antara nilai-nilai tersebut misalnya pada 4,5 m/s, 7,5 m/s, atau bahkan melebihi 9 m/s berpotensi menghasilkan pemetaan kurva performa yang lebih detail dan menyeluruh.

Data yang lebih rapat pada sumbu kecepatan udara akan memungkinkan identifikasi titik infleksi atau kecepatan kritis (*critical airflow threshold*) yang secara tepat memisahkan zona *complete combustion* dari zona *over-aeration*, sehingga rekomendasi parameter operasional yang dihasilkan dapat lebih presisi dan aplikatif untuk pengembangan desain kompor biomassa generasi berikutnya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan cakupan variasi kecepatan

udara yang lebih luas sangat direkomendasikan sebagai langkah pengembangan yang berarti. Di samping itu, sistem pengelolaan asap yang diterapkan mampu mengonversi asap sisa pembakaran menjadi sumber panas tambahan melalui proses gasifikasi, sehingga menghasilkan panas yang stabil dan merata untuk keperluan memasak dengan tingkat asap dan jelaga yang sangat rendah.



Gambar 1. Desain Kompor Bio Massa

2.2 Biopellet

Konstruksi kompor biomassa yang menjadi subjek kajian dalam penelitian ini ditampilkan secara visual pada Gambar 2, yang menyajikan rancangan alat dari empat perspektif berbeda, meliputi tampak samping, tampak depan, tampak atas, serta representasi tiga dimensi (3-D) beserta seluruh spesifikasi dimensinya. Keseluruhan proses perancangan dan pemodelan geometri dikerjakan menggunakan piranti lunak teknik *SolidWorks*. Bahan konstruksi utama yang dipilih adalah pelat baja tipe ASTM A36 dengan ketebalan 1,5 mm.

Dalam penelitian ini, dua jenis bahan bakar utama yang diuji adalah biopellet berbasis campuran serbuk gergaji dan dedak padi, serta kayu sebagai pembandingan konvensional. Kedua bahan bakar tersebut dipilih berdasarkan ketersediaannya yang tinggi di wilayah agroindustri Indonesia serta nilai kalor yang representatif sebagai bahan bakar biomassa. Namun demikian, perlu dipahami bahwa karakteristik pembakaran biomassa sangat dipengaruhi oleh komposisi kimiawi, kerapatan (*bulk density*), kadar air (*moisture content*), serta kandungan volatil dari masing-masing jenis bahan bakar. Oleh karena itu, perluasan jenis bahan bakar pada penelitian berikutnya misalnya dengan menyertakan biopellet berbasis cangkang kelapa sawit, sekam padi terpadatkan (*rice husk briquette*), atau campuran biomassa agroindustri lainnya akan memperkaya basis data pembakaran dan memberikan gambaran yang lebih representatif tentang potensi pemanfaatan berbagai limbah agroindustri lokal sebagai sumber energi terbarukan yang bernilai ekonomis.

Kompor ini memiliki ukuran total $520 \times 250 \times 190$ mm dan bekerja berdasarkan prinsip pembakaran biopellet secara efisien, ditunjang oleh pasokan udara teratur yang disalurkan melalui *blower* pada tiga tingkatan kecepatan, yakni 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s, demi menjaga keoptimalan proses pembakaran. Selain itu, sistem manajemen asap yang diterapkan mampu mengubah gas sisa pembakaran menjadi energi panas tambahan lewat mekanisme *gasifikasi*, sehingga menghasilkan panas yang konsisten untuk memasak dengan emisi asap dan jelaga yang sangat minim.



Gambar 2. Bio Pellet

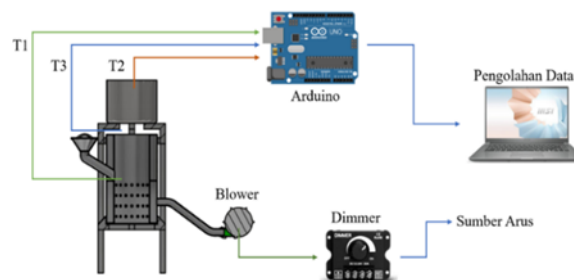
2.3 Skema Eksperimen

Prosedur pengujian pada kompor biomassa ditampilkan secara visual dalam Gambar 3. Tahap awal dimulai dengan memasukkan biopellet ke dalam ruang bahan bakar kompor, kemudian proses pembakaran diinisiasi di dalam ruang tersebut secara bersamaan dengan mengaktifkan *blower*. Jenis *blower* yang digunakan dalam penelitian ini adalah TORA TR0900062 berukuran 2,5 *inch* dengan daya masukan sebesar 250 W. Intensitas nyala api yang terbentuk pada kompor biomassa selanjutnya disesuaikan berdasarkan kecepatan aliran udara yang telah ditetapkan, yakni 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s, yang

dikendalikan secara presisi melalui perangkat *Dimmer* merek Depo LED DIMR. OUTB30A berkapasitas 30 A dengan tegangan DC 12–24 V. Pemantauan temperatur dilakukan secara simultan pada tiga titik pengukuran yang berbeda, yaitu T1 yang berlokasi di ruang penyimpanan bahan bakar kompor, T2 pada bagian pipa api, dan T3 tepat pada zona nyala api. Seluruh pembacaan suhu direkam menggunakan *thermocouple* tipe K dari merek AND Teknologi AD-1214. Data keluaran dari sensor *thermocouple* tersebut kemudian diteruskan dan diintegrasikan ke dalam mikrokontroler *Arduino Uno ATMEGA 328P CH340* untuk diproses lebih lanjut. Semua hasil pemantauan terkait dampak kecepatan aliran udara terhadap kinerja kompor biomassa ditampilkan dan dianalisis menggunakan laptop HP yang dilengkapi dengan prosesor Intel Core i7, RAM 16GB, dan SSD 1TB, guna menghitung nilai *heat transfer rate*, *sensible heat*, *latent heat*, *Fuel Consumption Rate* (FCR), serta efisiensi termal secara menyeluruh.

Di luar parameter termal yang telah dibahas, penilaian performa kompor biomassa secara komprehensif sejatinya juga harus melibatkan pengukuran emisi gas buang yang terbentuk sepanjang proses pembakaran. Indikator emisi yang perlu diperhatikan mencakup konsentrasi karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), serta partikulat halus PM_{2,5} dan PM₁₀, yang kesemuanya merupakan penanda utama dalam menilai kualitas pembakaran sekaligus dampaknya terhadap lingkungan sekitar. Agar data yang diperoleh lebih representatif, pengukuran emisi tersebut sebaiknya dikombinasikan dengan pemantauan kualitas udara di area sekitar zona pembakaran secara langsung menggunakan sensor gas yang sesuai.

Dalam penelitian ini, pemantauan suhu menggunakan *thermocouple* tipe K yang terintegrasi dengan mikrokontroler *Arduino Uno* telah mampu merekam profil temperatur secara bersamaan pada tiga titik berbeda dengan hasil yang memadai. Namun, untuk keperluan pengukuran emisi gas secara kuantitatif, dibutuhkan perangkat tambahan berupa *gas analyzer* portabel berbasis sensor elektrokimia maupun inframerah (*Non-Dispersive Infrared/NDIR*) yang dapat mengukur konsentrasi CO dan CO₂ secara presisi dalam satuan ppm. Apabila sistem pemantauan emisi ini diintegrasikan pada penelitian berikutnya, dataset yang dihasilkan akan jauh lebih lengkap, sehingga evaluasi kompor biomassa tidak lagi terbatas pada efisiensi termal saja, tetapi turut menjangkau aspek lingkungan yang sama pentingnya dalam kerangka pengembangan teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan.



Gambar 3. Skema Eksperimen Biomassa

2.4 Reduksi Data Eksperimen

Pada kompor biomassa, *thermal efficiency* umumnya didefinisikan sebagai rasio persentase energi bahan bakar yang berhasil dimanfaatkan untuk proses pemanasan sekaligus penguapan air [13]. Nilai efisiensi termal tersebut dapat ditentukan melalui persamaan (1).

$$\eta = \frac{(m_{\text{water}} \times C_p \times \Delta T) + (m_{\text{evap}} \times L \times \Delta T)}{(m_{\text{fuel}} \times HHV)} \times \quad (1)$$

Berdasarkan ketentuan standar SNI 8021:2014, batas maksimum *moisture content* atau kadar air yang diperbolehkan pada biopellet adalah 12%, meskipun sejumlah temuan eksperimental kerap menunjukkan hasil yang lebih variatif, yakni berkisar antara 2,94% hingga 13,16%. Secara umum, semakin rendah *moisture content* biopellet idealnya di bawah 10% maka semakin tinggi *heating value* serta efisiensi pembakarannya, diikuti dengan produksi asap yang lebih minimal [4], [5]. Nilai *moisture content* biopellet diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan (2).

$$M = \frac{m_{fuel\ wet} - (m_{fuel\ dry} \times L \times \Delta T)}{m_{fuel\ wet}} \times 100\% \quad (2)$$

Specific Fuel Consumption (SFC) biopellet menggambarkan besaran kuantitas biopellet yang diperlukan untuk memproduksi satu satuan energi tertentu, seperti per kg uap yang dihasilkan, per kWh, maupun per liter air yang berhasil mendidih [7]. Biopellet dikenal luas memiliki tingkat efisiensi yang unggul, hal ini tidak terlepas dari karakteristiknya yang memiliki *density* tinggi serta *heating value* yang konsisten dan seragam [6]. Nilai SFC biopellet selanjutnya dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan rumus (3).

$$SFC = \frac{m_{fuel}}{V_{water\ boiling}} \quad (3)$$

Specific Fuel Consumption (SFC) biopellet menggambarkan besaran massa biopellet (dalam satuan kg) yang diperlukan guna menghasilkan satu satuan energi tertentu (kWh atau MJ), maupun untuk menuntaskan suatu proses kerja spesifik seperti mendidihkan air (F. Karmal et al., 2022). Nilai

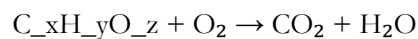
Specific Fuel Consumption (SFC) biopellet tersebut dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan rumus (4).

$$SFC = \frac{m_{fuel}}{t} \quad (4)$$

Tingkat konsumsi bahan bakar biopellet pada kompor biomassa secara umum berada pada rentang 0,5 hingga 1,5 kg/jam, di mana angka tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik desain kompor serta pengaturan intensitas laju aliran udara yang diterapkan [1]. Kandungan nilai kalor biopellet yang dimanfaatkan berkisar antara 4.500 hingga 5.100 kkal/kg, sementara efisiensi termal kompor yang diperoleh bervariasi dalam rentang 25% hingga 40% bergantung pada kondisi operasionalnya (R. Djafar et al., 2023). Kapasitas daya yang mampu dihasilkan oleh kompor biomassa umumnya berada pada kisaran 350 Watt sampai melebihi 5 kW, tergantung pada konstruksi alat, jenis bahan bakar yang digunakan, serta kapasitas ruang pembakaran yang tersedia [8]. Perangkat ini tergolong hemat energi karena cukup memanfaatkan *fan* DC berdaya kecil sekitar 1,5 Watt untuk mengoptimalkan proses pembakaran, dan mampu menghasilkan panas yang tinggi berdasarkan pengujian *Water Boiling Test* (WBT) dengan kebutuhan bahan bakar berkisar antara 800 gram hingga 1 kg per jam [1], [3]. Besaran daya kompor biomassa selanjutnya dapat ditentukan secara matematis menggunakan persamaan (5).

$$P = \frac{m_{fuel} \times HHV}{t \times 60} \quad (4)$$

Sebagai landasan teoritis yang memperkuat interpretasi data eksperimental, analisis pembakaran biomassa pada kompor ini juga dapat didekati melalui pemodelan stoikiometri reaksi pembakaran (*combustion stoichiometry model*). Secara teori, proses pembakaran sempurna (*complete combustion*) pada bahan bakar organik yang mengandung unsur karbon dan hidrogen dapat digambarkan melalui reaksi umum berikut:



Perbandingan antara rasio udara-bahan bakar aktual (*Actual Air-Fuel Ratio/ AFR*) dengan rasio udara-bahan bakar secara stoikiometris selanjutnya dinyatakan dalam bentuk koefisien udara berlebih (λ), yang dirumuskan secara matematis sebagai:

$$\lambda = AFR_{\text{aktual}} / AFR_{\text{stoikiometri}}$$

Nilai λ yang lebih kecil dari 1 menandakan kondisi kekurangan udara (*fuel-rich*) yang berpotensi memicu pembakaran tidak sempurna, sedangkan nilai λ di atas 1 mengindikasikan keberadaan udara berlebih (*fuel-lean*). Kondisi pembakaran yang paling ideal secara teoritis dicapai ketika λ mendekati angka 1, yaitu saat seluruh bahan bakar teroksidasi secara sempurna dengan pasokan oksigen yang tepat.

Nilai $\lambda < 1$ mengindikasikan kondisi kekurangan udara (*fuel-rich mixture*) yang berpotensi menghasilkan pembakaran tidak sempurna, sementara $\lambda > 1$ menunjukkan kondisi udara berlebih (*fuel-lean mixture*). Kondisi pembakaran paling optimal secara teoritis dicapai mendekati $\lambda = 1$, yakni ketika seluruh bahan bakar teroksidasi secara sempurna dengan ketersediaan oksigen yang tepat. Pendekatan model teoritis ini menjadi kerangka acuan dalam menganalisis pengaruh variasi kecepatan aliran udara (3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s) terhadap kualitas pembakaran biopellet maupun kayu yang diuji dalam penelitian ini, di mana peningkatan kecepatan udara secara langsung berimplikasi pada pergeseran nilai λ menuju kondisi yang lebih mendekati pembakaran sempurna hingga batas tertentu. Integrasi model teoritis dengan data eksperimen seperti ini menjadikan analisis hasil penelitian lebih robust, tervalidasi secara ilmiah, dan mampu memberikan penjelasan mekanistik yang lebih mendalam terhadap fenomena yang diamati.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Pembakaran

Kompur biomassa pada Gambar 4 yang tengah diuji dalam rangka menganalisis karakteristik pembakarannya terbukti mampu bekerja secara efektif dalam proses pembakaran biopellet. Sistem pasokan udara yang dikontrol melalui perangkat *dimmer* dan *blower* memungkinkan intensitas pembakaran diatur secara presisi guna mencapai kondisi pembakaran yang paling ideal. Di samping itu, mekanisme pengelolaan gas sisa pembakaran yang dikonversi menjadi energi kalor tambahan melalui proses *gasifikasi* menghasilkan panas yang merata dan konsisten, sehingga proses memasak dapat berlangsung dengan emisi asap dan *jelaga* yang sangat minim. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan perolehan energi dari bahan bakar sekaligus menekan emisi yang dihasilkan, menjadikan kompor biomassa sebagai solusi yang lebih hemat secara ekonomi dan lebih bertanggung jawab terhadap lingkungan bila dibandingkan dengan kompor berbahan bakar konvensional. Pembahasan dalam penelitian ini dipaparkan secara rinci guna mengungkap berbagai fenomena fisika yang terjadi pada kompor biomassa, salah satunya adalah perilaku dan karakteristik *flame* sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil pengamatan, zona bagian bawah pusat *flame* didominasi oleh warna biru dengan rentang temperatur antara 500°C hingga 950°C, sedangkan warna kuning hingga merah cenderung mendominasi area tengah hingga ujung *flame* dengan temperatur berkisar antara 500°C hingga 700°C.



Biopellet

Kayu

Gambar 4. Hasil Perbandingan Pembakaran Biopellet dan Kayu pada Kompor Biomassa

Pola perkembangan *flame* pada kompor biomassa memperlihatkan tingkat konsistensi dan stabilitas yang cukup baik, baik pada zona berwarna biru maupun pada zona kuning kemerahan. Ketinggian *flame* mengalami peningkatan yang sebanding dengan naiknya laju aliran udara, yakni pada pengaturan 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s, di mana panjang nyala api dapat mencapai kisaran 30 cm hingga 50 cm. Bunyi letupan dan gemericik yang terdengar selama proses berlangsung mengindikasikan bahwa pembakaran biopellet berjalan dengan baik dan menghasilkan energi secara optimal. Energi termal yang terbentuk merupakan hasil dari konversi *chemical energy* yang tersimpan dalam gas menjadi energi panas pada saat pembakaran berlangsung. Dalam kondisi operasional yang optimal, *flame* pada pembakaran biomassa umumnya menunjukkan intensitas yang setara atau bahkan sedikit lebih tinggi, hal ini disebabkan oleh *density* serta *calorific value* biopellet yang lebih seragam dan lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar kayu mentah.

Untuk memperkaya kedalaman analisis perbandingan, capaian performa kompor biomassa dalam penelitian ini perlu disandingkan dengan teknologi memasak konvensional yang masih banyak digunakan masyarakat, yaitu kompor LPG maupun kompor kayu bakar tradisional tanpa sistem pengatur aliran udara. Berdasarkan penelusuran literatur, kompor tradisional tipe *three-stone fire* (TSF) diketahui hanya mampu menghasilkan efisiensi termal antara 12% hingga 17%, angka yang jauh tertinggal dibandingkan kompor biomassa bersistem udara paksa (*forced draft*) yang secara konsisten mampu mencapai efisiensi antara 30% hingga 46%, tergantung pada konfigurasi desain dan kondisi pengoperasiannya [16].

Di sisi lain, kompor LPG konvensional memang mencatatkan efisiensi termal yang lebih tinggi, yakni berkisar antara 53% hingga 57%, namun ketergantungannya yang penuh terhadap bahan bakar fosil impor menimbulkan kerawanan tersendiri, baik bagi kestabilan ekonomi rumah tangga maupun ketahanan energi nasional dalam jangka panjang. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, efisiensi termal tertinggi yang diraih dalam penelitian ini sebesar 46,349% untuk biopellet dan 41,381% untuk kayu merupakan hasil yang sangat kompetitif. Capaian ini mempertegas bahwa kompor biomassa generasi terkini tidak hanya unggul dari aspek teknis, tetapi juga menawarkan kemandirian energi yang lebih baik dibandingkan kompor berbahan bakar fosil konvensional.

3.2 Pengaruh Variasi Waktu Pembakaran

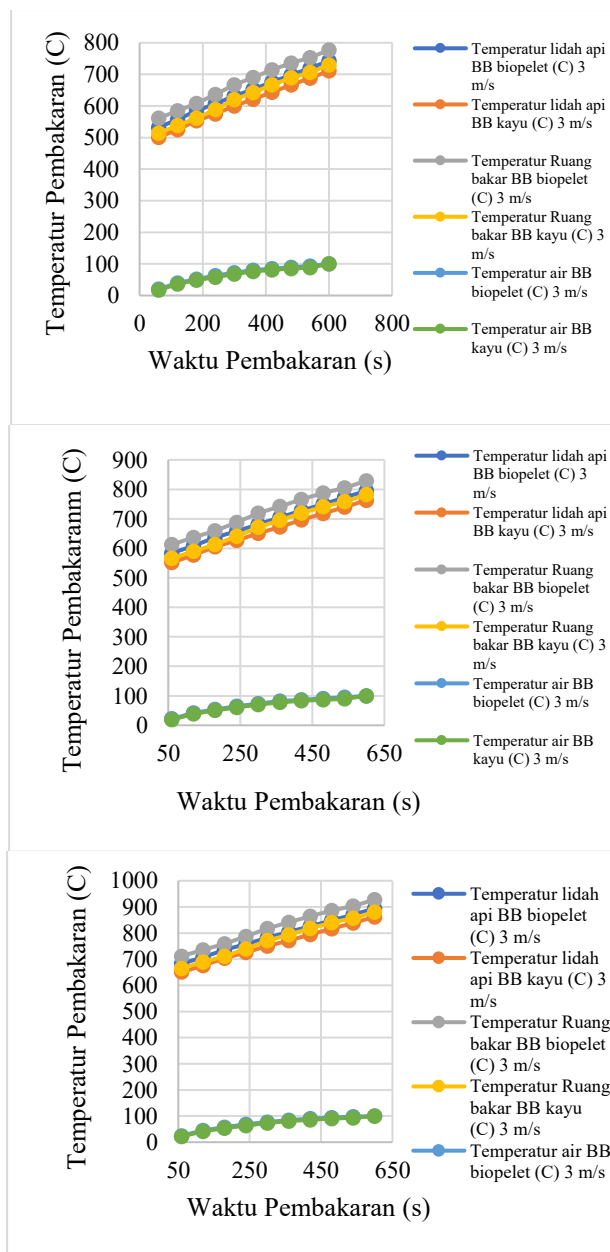
Telah terbukti bahwa rentang interval durasi pembakaran yang digunakan, mulai dari 60 detik, 120 detik, 180 detik, 240 detik, 300 detik, 360 detik, 420 detik, 480 detik, 540 detik hingga 600 detik, memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik nyala api yang dihasilkan selama proses tersebut. Pada kondisi pembakaran dengan laju yang relatif tinggi, nyala api yang dihasilkan cenderung berukuran lebih kecil, berwarna dominan biru sebagai indikator terjadinya pembakaran sempurna, serta menghasilkan suhu yang lebih tinggi sebagai konsekuensi dari tingginya efisiensi proses oksidasi yang berlangsung. Kondisi sebaliknya ditemui ketika durasi pembakaran diperpanjang secara signifikan, yakni nyala api yang terbentuk cenderung bergeser ke warna oranye hingga kuning dengan profil yang lebih melebar dan tingkat efisiensi yang menurun.

Kondisi ini umumnya diperparah oleh faktor-faktor seperti tingginya kadar air dalam bahan bakar maupun viskositas bahan bakar yang menghambat proses pencampuran dengan udara secara merata, sehingga berujung pada pembakaran yang tidak berlangsung sempurna dan terjadinya inefisiensi energi. Durasi pembakaran yang lebih singkat secara konsisten menghasilkan nyala api berwarna biru dengan ketinggian yang relatif rendah, hal ini terjadi berkat ketersediaan suplai oksigen yang memadai serta laju reaksi kimia yang berlangsung cepat. Kondisi tersebut berdampak langsung pada tingginya karakteristik dan efisiensi pembakaran, dengan laju pelepasan panas yang lebih cepat serta nilai *Heat Release Rate* (HRR) yang tinggi.

Salah satu dimensi yang tak kalah penting dalam penilaian performa kompor biomassa secara menyeluruh adalah profil emisi gas buang yang terbentuk selama proses pembakaran berlangsung. Meski pengukuran emisi secara langsung belum masuk dalam cakupan eksperimental penelitian ini, analisis teoritis berdasarkan pola nyala api yang teramati setidaknya dapat memberikan gambaran awal mengenai kemungkinan karakteristik emisi yang dihasilkan. Pada fase awal pembakaran dengan durasi yang relatif singkat, nyala api berwarna biru mengindikasikan bahwa proses oksidasi berlangsung mendekati sempurna, sehingga

kadar CO yang dilepaskan cenderung rendah sementara CO₂ menjadi produk dominan sebagai hasil pembakaran karbon yang tuntas. Sebaliknya, ketika durasi pembakaran semakin panjang dan warna nyala api bergeser ke oranye atau kuning, kondisi pembakaran tidak sempurna (*incomplete combustion*) mulai terjadi, ditandai dengan meningkatnya konsentrasi CO serta bertambahnya emisi partikulat halus PM_{2,5} yang berpotensi menurunkan kualitas udara di sekitar area pembakaran secara signifikan.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengonfirmasi bahwa kompor biomassa bersistem *forced draft* mampu menekan emisi CO hingga 85% dan partikulat total hingga 89% dibandingkan kompor berbasis api terbuka, dengan kunci utamanya terletak pada ketepatan rasio aliran udara yang diterapkan. Atas dasar itu, penelitian lanjutan yang melibatkan pemantauan emisi CO, CO₂, dan PM_{2,5} secara *real-time* selama pengujian WBT akan menghasilkan evaluasi performa yang jauh lebih komprehensif dan bermakna dari sudut pandang lingkungan.



Gambar 5. Hubungan antara Temperatur Pembakaran terhadap Waktu Pembakaran diberbagai Variasi Kecepatan Udara

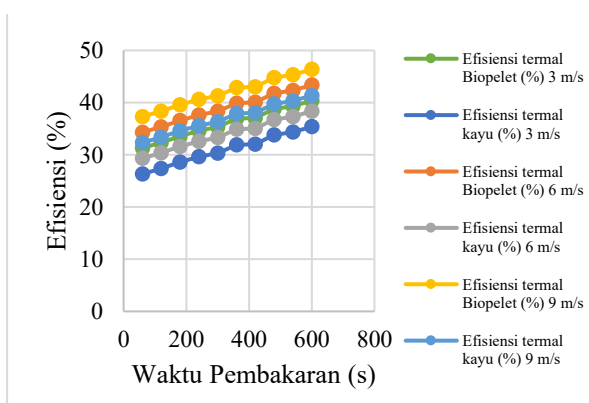
Sementara itu, pada durasi pembakaran yang lebih panjang, nyala api mampu bertahan dalam jangka waktu lebih lama dan menghasilkan profil pembakaran dengan karakteristik serta efisiensi yang lebih unggul secara keseluruhan. Hubungan antara temperatur

pembakaran dan durasi pembakaran pada berbagai variasi kecepatan udara dapat diamati lebih lanjut pada Gambar 5. Secara umum, suhu minimum di zona api dan di ruang pembakaran diukur dan dicatat di basis biomassa. pada kondisi pengujian dengan kecepatan aliran udara sebesar 3 m/s yang diaplikasikan pada berbagai interval durasi pembakaran, baik dengan bahan bakar biopellet maupun kayu. Pada kondisi ini, temperatur zona nyala api tercatat mencapai 743°C, sementara temperatur pada ruang bakar terukur sebesar 777°C ketika menggunakan biopellet sebagai bahan bakar. Adapun pada bahan bakar kayu, temperatur zona nyala api yang terukur berada pada angka 711°C dengan temperatur ruang bakar sebesar 730°C. Peningkatan kecepatan aliran udara menjadi 6 m/s menghasilkan kenaikan temperatur yang terukur secara signifikan, di mana zona nyala api dengan biopellet mencapai 795°C dan ruang bakar tercatat 829°C, sedangkan pada kayu diperoleh temperatur nyala api sebesar 763°C dengan ruang bakar 782°C.

Nilai temperatur tertinggi secara keseluruhan berhasil dicapai pada pengaturan kecepatan aliran udara 9 m/s, di mana temperatur zona nyala api dengan biopellet mencapai puncaknya di angka 894°C disertai temperatur ruang bakar sebesar 928°C. Sementara pada kayu, temperatur nyala api terukur sebesar 862°C dengan temperatur ruang bakar 881°C. Seluruh rangkaian data temperatur di atas diperoleh secara eksklusif dari pengujian dengan durasi pembakaran 600 detik.

3.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Udara

Penerapan variasi kecepatan udara pada nilai 3 m/s, 6 m/s, dan 9 m/s bertujuan untuk mengintensifkan laju reaksi pembakaran di dalam ruang bakar, sehingga mampu menghasilkan nyala api yang lebih tinggi dan bertenaga. Pada kondisi pasokan udara yang mencukupi, nyala api cenderung berwarna biru sebagai indikator terjadinya *complete combustion* akibat ketersediaan oksigen yang memadai. Namun demikian, laju aliran udara yang berlebihan justru berisiko mempercepat habisnya bahan bakar serta menyebabkan *flame* menjadi tidak konsisten, pendek, maupun berfluktuasi, yang pada akhirnya berdampak langsung terhadap perubahan *flame intensity* dan *burning duration*. Kondisi pasokan udara yang terlalu rendah akan memicu terjadinya *incomplete combustion*, yang ditandai dengan munculnya nyala api berwarna oranye atau kuning disertai produksi *soot* dalam jumlah besar. Sebaliknya, pasokan udara yang berlebih mengakibatkan *flame* menjadi terlalu panas, menjulang tinggi, boros bahan bakar, dan cenderung tidak stabil. Titik optimal tercapai ketika *airflow* berada pada rasio yang ideal, menghasilkan *stable blue flame* dengan output kalor maksimum sekaligus *thermal efficiency* tertinggi. Secara keseluruhan, efisiensi *combustion* pada kompor biomassa dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang saling berkaitan, meliputi *airflow rate*, jenis bahan bakar, konfigurasi *burner*, profil temperatur dimana *blue flame* mengindikasikan suhu yang lebih tinggi dibanding *red flame* tingkat *flame stability*, *flame height*, serta munculnya suara *hissing* saat cadangan bahan bakar mendekati habis.



Gambar 6. Hubungan antara Temperatur Pembakaran terhadap Waktu Pembakaran diberbagai Variasi Kecepatan Udara

Optimum combustion ditandai dengan terbentuknya *stable* dan efisien *blue flame*, sedangkan nyala berwarna merah atau kuning mengonfirmasi bahwa proses pembakaran berlangsung tidak sempurna atau suplai bahan bakar mulai menipis. Hubungan antara temperatur

pembakaran terhadap waktu pembakaran pada berbagai variasi kecepatan udara ditampilkan secara grafis pada Gambar 6.

Pengujian termal pada kompor biomassa memperlihatkan bahwa biopellet dan kayu menghasilkan nilai *thermal efficiency* yang bervariasi sesuai dengan intensitas aliran udara yang diterapkan. Pada kondisi kecepatan udara terendah, yakni 3 m/s, perolehan *thermal efficiency* berada di titik paling rendah, masing-masing sebesar 40,365% untuk biopellet dan 35,372% untuk kayu. Ketika kecepatan dinaikkan ke 6 m/s, terjadi peningkatan yang cukup signifikan, di mana *thermal efficiency* biopellet mencapai 43,352% dan kayu sebesar 38,369%. Puncak performa terbaik diraih saat kecepatan udara mencapai 9 m/s, dengan *thermal efficiency* tertinggi sebesar 46,349% pada biopellet dan 41,381% pada kayu. Keseluruhan data tersebut diperoleh berdasarkan pengujian *Water Boiling Test* (WBT) dengan durasi pembakaran tetap selama 600 detik. Temuan ini diharapkan mampu menjadi landasan teknis dalam pengembangan desain kompor biomassa yang lebih *energy-efficient* sekaligus ramah lingkungan. Secara khusus, kombinasi kecepatan udara 9 m/s bersama durasi pembakaran 600 detik direkomendasikan sebagai setelan operasional paling optimal, baik untuk bahan bakar biopellet maupun kayu dalam penerapan nyata di lapangan.

Temuan dalam penelitian ini selaras dengan kecenderungan yang secara konsisten dilaporkan dalam berbagai literatur internasional, bahwa penambahan laju aliran udara pada kompor biomassa tipe *forced draft* berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi termal namun hanya sampai pada batas tertentu, karena pasokan udara yang terlalu berlebih justru kontraproduktif akibat terjadinya pemadaman nyala api (*flame quenching*) yang tidak dikehendaki. Studi parametrik pada kompor biomassa berbasis gasifikasi mengungkapkan bahwa perbedaan kerapatan bahan bakar serta rasio antara udara pembakaran dan udara gasifikasi berpengaruh nyata terhadap profil emisi CO maupun kadar partikulat secara keseluruhan. Dalam hal ini, biopellet terbukti lebih unggul dibandingkan bahan bakar berbentuk serpihan (*chips*), yang disebabkan oleh kerapatan massanya yang lebih tinggi serta nilai kalor yang lebih konsisten dan seragam. Sejalan dengan itu, tinjauan menyeluruh terhadap berbagai teknologi kompor biomassa juga menegaskan bahwa kompor *forced draft* secara teknis menghasilkan emisi yang lebih rendah sekaligus efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan kompor *natural draft* maupun kompor tradisional, dengan catatan bahwa laju dan distribusi aliran udara harus dikendalikan secara cermat. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi berupa data eksperimental yang sah dan aplikatif dalam memperkuat landasan ilmiah optimasi kompor biomassa bersistem udara paksa, khususnya dalam konteks pengembangan biopellet berbasis limbah agroindustri lokal di Indonesia.

4. Perbandingan

Capaian efisiensi termal tertinggi dalam penelitian ini sebesar 46,349% untuk biopellet dan 41,381% untuk kayu merupakan hasil yang kompetitif dibandingkan literatur terdahulu. Kompor tradisional *three-stone fire* hanya mampu menghasilkan efisiensi 12–17%, sementara kompor biomassa *natural draft* teroptimasi dalam kajian Hayyat et al. (2024) mencapai 42%, dan desain yang disempurnakan oleh Destaw et al. (2025) rata-rata hanya 31%. Dari aspek suhu pembakaran, penelitian ini mencatatkan puncak temperatur 894°C pada zona nyala api biopellet dengan kecepatan udara 9 m/s, melampaui kajian terdahulu yang melaporkan suhu maksimum 860°C pada kecepatan 8 m/s. Konsumsi bahan bakar biopellet juga terbukti lebih efisien dibandingkan kayu konvensional, sejalan dengan karakteristik *bulk density* dan nilai kalor yang lebih seragam. Secara keseluruhan, penelitian ini memperkuat landasan ilmiah optimasi kompor biomassa *forced draft* berbasis limbah agroindustri lokal.

5. Kesimpulan

Pada pengaturan kecepatan aliran udara sebesar 9 m/s, hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu *flame temperature* pada pembakaran biopellet mampu mencapai angka 894°C, sementara suhu di dalam *combustion chamber* tercatat hingga 928°C. Adapun ketika bahan bakar kayu digunakan sebagai pengganti, *flame temperature* yang terukur berada pada kisaran 862°C dengan suhu *combustion chamber* mencapai 881°C. Dari keseluruhan data yang berhasil dihimpun dengan mempertimbangkan variasi *burning duration* hingga 600 detik, diperoleh fakta bahwa *thermal efficiency* tertinggi konsisten tercapai pada kecepatan udara 9 m/s, yakni sebesar 46,349% untuk biopellet dan 41,381% untuk kayu. Hasil ini diharapkan mampu menjadi landasan ilmiah yang aplikatif dalam proses perancangan kompor biomassa berefisiensi tinggi.

Oleh karena itu, *air velocity* 9 m/s dan *burning duration* 600 detik direkomendasikan sebagai parameter operasional yang optimal, baik untuk bahan bakar kayu maupun biopelet.

Ditinjau dari sisi sosial-ekonomi, penggunaan limbah agroindustri sebagai bahan bakar utama berpotensi meringankan pengeluaran energi rumah tangga sekaligus memperkokoh kemandirian energi masyarakat pedesaan secara jangka panjang. Di sisi lain, dominasi nyala api berwarna biru yang muncul pada kecepatan udara tinggi mengisyaratkan bahwa proses pembakaran cenderung berlangsung lebih sempurna, dengan kemungkinan penurunan emisi CO dan PM_{2,5} yang cukup berarti meskipun konfirmasi secara kuantitatif melalui pengukuran langsung tetap diperlukan untuk memvalidasi dugaan tersebut. Oleh karena itu, penelitian berikutnya disarankan untuk mengintegrasikan pemantauan emisi secara *real-time*, memperluas rentang variasi kecepatan aliran udara yang diuji, serta menjajaki potensi jenis biomassa lokal lainnya sebagai bahan bakar, demi memperkuat fondasi ilmiah bagi pengembangan kompor biomassa yang lebih canggih dan efisien di masa mendatang.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: Penulis-1 dan Penulis-2; Metodologi: Penulis-1; Perangkat Lunak: Penulis-1; Validasi: Penulis-1, Penulis-2, dan Penulis-3; Analisis Formal: Penulis-1; Investigasi: Penulis-1 dan Penulis-2; Sumber Daya: Penulis-2; Kurasi Data: Penulis-1; Penulisan Persiapan Draf Awal: Penulis-1; Penulisan Peninjauan dan Penyuntingan: Penulis-2 dan Penulis-3; Visualisasi: Penulis-1; Supervisi: Penulis-3; Administrasi Proyek: Penulis-2; Akuisisi Pendanaan: Penulis-3. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia atas permintaan yang ditujukan kepada penulis korespondensi. Data tidak tersedia secara publik karena keterbatasan teknis terkait format penyimpanan data eksperimental yang digunakan selama pengujian berlangsung.

Ucapan Terima Kasih: Para penulis menyampaikan apresiasi kepada LPPM Universitas Samudra Langsa, Laboratorium Terpadu Universitas Samudra Langsa, Laboratorium Efisiensi dan Konservasi Energi Universitas Diponegoro, serta Laboratorium Teknologi Konversi Energi Universitas PGRI Semarang atas dukungan fasilitas dan teknis selama pelaksanaan penelitian ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan. Penelitian ini tidak melibatkan penyandang dana eksternal, sehingga tidak terdapat pengaruh pihak luar terhadap desain studi, pengumpulan, analisis, maupun interpretasi data, penulisan naskah, atau keputusan untuk mempublikasikan hasil penelitian.

Referensi

- [1] D. Turnip, Hamdani, and Suheri., "Rancang Bangun Kompor Biomassa Sistem Udara Paksa Dengan Bahan Bakar Biopelet," 2025.
- [2] R. M. Veranika, M. Ali, and M. Fadli, "Optimasi Jumlah Lubang Udara Pada Reaktor Kompor Biomassa Untuk Peningkatan Daya Termoelektrik Generator," vol. 13, pp. 133–142, 2025.
- [3] S. D. A. Febriani, R. Setyowati, and D. A. Prasetyo, "Efisiensi Kompor Biomassa Ub 03-01 dengan Bahan Bakar Serbuk Kayu Jati dan Sengon," *J-TETA*, vol. 2, no. 1, pp. 31–41, 2023.
- [4] A. Nayan, A. Setiawan, A. Asnawi, D. Siska, R. Ridara, and I. A. Pertiwi, "Pemanfaatan teknologi kompor roket biomassa untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil di Desa Keude Krueng Kecamatan Kuta Makmur Aceh Utara," *J. Solusi Masy. Dikara*, vol. 1, no. 1, pp. 21–26, 2021.
- [5] F. Goembira, A. Nazir, A. Husna, and T. Ihsan, "Analisis Konsentrasi PM_{2,5}, CO dan CO₂ di Dalam Ruangan Akibat Penggunaan Kompor Biomassa Berbahan Bakar Briket Tempurung Kelapa dan Briket Kayu Bakar," *Dampak*, vol. 16, no. 1, pp. 42–50, 2019.
- [6] R. A. Putra, P. Studi, T. Energi, J. T. Kimia, and P. N. Sriwijaya, "Analisis pengaruh kecepatan aliran udara terhadap

- performa kompor biomassa top-lit up draft (T-LUD) berbahan bakar biopellet kayu jati - chips bambu betung,” vol. 26, no. September 2024, pp. 311–317, 2025.
- [7] L. R. Idji, S. Haluti, E. S. Antu, P. Gorontalo, and P. Gorontalo, “Rancang bangun kompor biomassa berbahan bakar kayu,” vol. 5, pp. 17–21, 2025.
- [8] N. E. Putra, “Rancang Bangun Kompor Biomassa sebagai Kompor Ramah Lingkungan,” vol. 5, no. 1, pp. 55–67, 2022, doi: 10.31004/jutin.v5i1.9789.
- [9] Aditya, “Reformasi Hukum Administrasi Negara dalam UU Cipta Kerja,” 2023.
- [10] J. Rahman, “Kompor Biomassa sebagai Salah Satu Teknologi Tepat Guna Masyarakat Pedesaan,” *Bul. Pembang. Berkelanjutan*, vol. 5, no. 2, 2021.
- [11] A. S. Nugroho, D. Achadi, and Y. Y. Kristianto, “Pelatihan Penggunaan Kompor Biomassa Guna Meningkatkan Produktifitas Pedagang Gorengan,” *PaKMas J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 1, no. 2, pp. 157–161, 2021.
- [12] F. Karmal, A. Hiendro, and R. A. Wicaksono, “Kompor Biomassa-Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Energi Listrik Untuk Penerangan,” vol. 3, no. 2, pp. 1–8, 2022.
- [13] M. F. Nurdin, H. Santoso, and M. Dahlan, “Analisis Nilai Kalor Pada Empat Sisi Dinding Kompor Biomassa,” vol. v, pp. 47–51, 2023.
- [14] R. Djafar, “Penerapan Kompor Biomassa Tipe Continue Bahan Bakar pada UMKM Dodol Matuari,” *J. Abdimas Gorontalo*, vol. 6, no. 2, pp. 108–113, 2023.
- [15] A. Y. Nasution *et al.*, “Analisa Desain Kompor Biomassa Berbahan Bakar Tempurung Kelapa Menggunakan Ansys,” vol. 10, no. 1, pp. 22–29, 2022.
- [16] S. U. Yunusa *et al.*, “Biomass cookstoves : A review of technical aspects and recent advances,” *Energy Nexus*, vol. 11, no. March, p. 100225, 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100225.