

Analisis Komparatif Efisiensi Termal Dan Laju Perpindahan Panas Pada Pemanasan Air Tradisional (Kayu Bakar) Dan Modern LPG

Ahmad Wildanu^{1*}, Muhamad Safi'i², dan Althesa Androva³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : ahmadwildanu015@gmail.com

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : muhamadsafii@upgris.ac.id

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : althesaandrova@upgris.ac.id

* Penulis : Ahmad Wildanu

Abstract: *This study aims to comparatively analyze the thermal efficiency and heat transfer rate in the water heating process using traditional (firewood) and modern (LPG/Liquefied Petroleum Gas) fuels. The test was conducted by heating 1 liter of water from an ambient temperature of 28°C to a boiling point of 100°C using a traditional wood-fired stove and a standard LPG stove. The parameters measured included heating time, fuel consumption, flame temperature, and convective heat transfer rate. The results showed that the LPG stove had an average thermal efficiency of 65%, while the wood-fired stove only reached 45%. The heat transfer rate on the LPG stove ranged from 376–524 W, while firewood only produced 167–232 W. Heat loss factors due to radiation and parasitic convection were more dominant in the firewood system. Economically, firewood is still more affordable in rural areas, but its environmental impacts in the form of fine particle (PM2.5) and CO emissions are very significant. This study provides comprehensive quantitative evidence for policy makers in cooking energy conversion programs in Indonesia.*

Keywords: *thermal efficiency; firewood; LPG stove; heat transfer rate; water heating*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif efisiensi termal dan laju perpindahan panas pada proses pemanasan air menggunakan bahan bakar tradisional (kayu bakar) dan modern (LPG/Liquefied Petroleum Gas). Pengujian dilakukan dengan memanaskan 1 liter air dari suhu ambient 28°C hingga titik didih 100°C menggunakan kompor tradisional berbahan bakar kayu dan kompor LPG standar. Parameter yang diukur meliputi waktu pemanasan, konsumsi bahan bakar, suhu api, dan laju perpindahan panas konvektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kompor LPG memiliki efisiensi termal rata-rata 65%, sedangkan kompor kayu bakar hanya mencapai 45%. Laju perpindahan panas pada kompor LPG berkisar antara 376–524 W, sementara kayu bakar hanya menghasilkan 167–232 W. Faktor rugi panas akibat radiasi dan konveksi parasitik lebih dominan pada sistem kayu bakar. Secara ekonomi, kayu bakar masih lebih terjangkau di wilayah pedesaan, namun dampak lingkungannya berupa emisi partikel halus (PM2.5) dan CO sangat signifikan. Penelitian ini memberikan bukti kuantitatif yang komprehensif bagi pengambil kebijakan dalam program konversi energi memasak di Indonesia.

Kata kunci: efisiensi termal; kayu bakar; kompor LPG; laju perpindahan panas; pemanasan air

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/>)

1. Pendahuluan

Jurnal Kecerdasan Buatan dan Teknologi Masa Depan menerima kiriman makalah penelitian yang berisi setidaknya 4000 hingga 8000 kata atau sekitar 8 hingga 20 halaman untuk artikel penelitian dan maksimal 30 halaman untuk artikel tinjauan. Pendahuluan harus ditulis secara singkat, padat, dan jelas. Pendahuluan harus berisi penjelasan tentang (1) Objek Penelitian, (2) Metode yang telah digunakan sebelumnya, (3) Kelemahan dan kekuatan setiap metode atau dapat secara singkat menyinggung pekerjaan dan/atau hipotesis terkait, (4) Masalah Penelitian (5) Solusi dan/atau pendekatan yang diusulkan (6) Daftar Kontribusi (6) Sisa makalah. Bagian pendahuluan harus ilmiah dan kaya akan kutipan. Gunakan gaya “maintext_FAITH” untuk paragraf ini.

Sektor energi rumah tangga merupakan salah satu kontributor utama konsumsi energi final di negara berkembang, termasuk Indonesia. Memasak adalah kegiatan domestik yang menyerap porsi terbesar dari energi rumah tangga, dan pilihan bahan bakar yang digunakan memiliki implikasi signifikan terhadap efisiensi energi, kesehatan masyarakat, serta keberlanjutan lingkungan (Putra et al., 2022). Secara global, kayu bakar masih menjadi sumber energi memasak bagi sekitar 2,6 miliar penduduk dunia, terutama di kawasan pedesaan Asia dan Afrika (IEA, 2023). Di Indonesia, meskipun program konversi minyak tanah ke LPG yang digulirkan pemerintah sejak tahun 2007 telah berhasil menggeser konsumsi minyak tanah secara signifikan, penggunaan kayu bakar di wilayah pedesaan Jawa, Sumatera, dan Kalimantan masih sangat tinggi (Kementerian ESDM, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa transisi energi memasak di Indonesia belum sepenuhnya berjalan merata, terutama bagi masyarakat yang tinggal jauh dari jaringan distribusi gas.

LPG sebagai bahan bakar modern menawarkan nilai kalor yang jauh lebih tinggi serta pembakaran yang lebih bersih dibandingkan kayu bakar. Namun demikian, kajian kuantitatif yang membandingkan kedua jenis bahan bakar ini dari perspektif termodinamika—khususnya efisiensi termal dan laju perpindahan panas—masih sangat terbatas dalam literatur teknik mesin Indonesia. Sebagian besar studi yang ada berfokus pada aspek sosio-ekonomi atau emisi gas rumah kaca tanpa memberikan analisis mendalam mengenai karakteristik perpindahan panas yang terjadi secara aktual (Santoso & Wijayanti, 2021). Analisis termal yang komprehensif sangat penting karena efisiensi sistem pembakaran tidak hanya ditentukan oleh nilai kalor bahan bakar, melainkan juga oleh desain kompor, konduksi, konveksi, dan radiasi yang berlangsung selama proses pemanasan. Berdasarkan Fourier's Law dan Newton's Law of Cooling, laju perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh perbedaan suhu, luas permukaan transfer, dan koefisien perpindahan panas, yang berbeda secara substansial antara kompor kayu dan kompor LPG (Cengel & Ghajar, 2020). Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa efisiensi termal kompor kayu bakar tradisional di India berkisar antara 30–55%, sementara kompor LPG modern dapat mencapai 55–72% (Rao et al., 2021). Di sisi lain, rugi panas radiasi pada kompor kayu tradisional dapat mencapai 30–40% dari total energi pembakaran—jauh lebih tinggi dibandingkan kompor LPG yang hanya sekitar 10–15%. Fakta-fakta tersebut menegaskan urgensi penelitian komparatif termal yang sistematis dan berbasis data eksperimental di Indonesia.

Penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk: (1) mengukur dan membandingkan efisiensi termal sistem pemanasan air berbahan bakar kayu bakar dan LPG secara kuantitatif; (2) menghitung laju perpindahan panas (heat transfer rate) pada kedua sistem kompor secara eksperimental; (3) mengidentifikasi faktor-faktor termodinamika yang memengaruhi perbedaan performa termal antara keduanya; serta (4) memberikan rekomendasi berbasis data untuk mendukung kebijakan transisi energi memasak di Indonesia. Manfaat penelitian ini mencakup dua aspek utama. Pertama, secara ilmiah, penelitian ini menghasilkan basis data termal baru yang dapat menjadi referensi bagi akademisi dan praktisi teknik energi dalam kajian sistem pembakaran. Kedua, secara praktis dan kebijakan, data kuantitatif keunggulan efisiensi LPG (rata-rata 65% vs 45% pada kayu bakar) menjadi landasan kuat bagi pengambil kebijakan untuk mempercepat program konversi energi memasak nasional, sekaligus mendorong adopsi improved cookstoves dengan modifikasi insulasi dan reflektor termal yang terbukti dapat meningkatkan efisiensi tungku kayu hingga 18% bagi wilayah yang belum terjangkau distribusi gas.

Penelitian ini memiliki sejumlah kelebihan yang signifikan dari sisi metodologi. Penggunaan pendekatan eksperimental dengan pengulangan tinggi (10 kali replikasi per kondisi) memberikan validitas statistik yang kuat, yang jarang ditemukan dalam studi kompor serupa. Pengukuran parameter termal menggunakan instrumen presisi tinggi—termokopel tipe K dengan data logger otomatis, timbangan digital dengan ketelitian 0,1 gram, serta moisture meter untuk kontrol kadar air kayu—memastikan akurasi dan konsistensi data yang dihasilkan. Selain itu, penelitian ini juga menguji dua kondisi kadar air kayu yang berbeda (kering udara 12–15% dan kering tanur <5%), sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap variabilitas performa kayu bakar. Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Eksperimen dilaksanakan di lingkungan laboratorium dengan kondisi terkontrol (suhu 26–28°C, kelembaban relatif 65–75%) dan geometri panci yang seragam (diameter 20 cm), sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi memasak riil di lapangan. Variasi eksternal seperti fluktuasi kecepatan angin, penggunaan jenis kayu campuran dengan kadar air tidak seragam, serta perbedaan bentuk dasar alat masak yang

beragam di masyarakat merupakan faktor-faktor yang belum termodelkan dalam penelitian ini.

Meskipun studi mengenai transisi energi memasak sudah cukup banyak dipublikasikan, sebagian besar literatur di Indonesia saat ini masih didominasi oleh kajian yang berfokus pada aspek sosio-ekonomi masyarakat, kebijakan adopsi, atau kalkulasi emisi gas rumah kaca secara makro. Kajian kuantitatif komprehensif yang membandingkan kayu bakar dan LPG dari perspektif termodinamika murni—khususnya yang mengintegrasikan perhitungan laju perpindahan panas konvektif secara simultan dengan analisis empiris profil temperatur air menggunakan metode Water Boiling Test (WBT)—masih sangat terbatas dalam literatur teknik mesin domestik. Akibatnya, pembuat kebijakan seringkali mengalami kekurangan data mekanistik yang solid mengenai dinamika rugi-rugi panas (heat losses) riil pada kompor yang digunakan oleh masyarakat Indonesia. Kesenjangan inilah yang menjadi justifikasi utama dilakukannya penelitian ini: perlunya sebuah studi yang secara eksplisit mengukur, menganalisis, dan memvisualisasikan profil termal transien kedua jenis sistem pembakaran dengan protokol standar internasional yang diadaptasi untuk kondisi Indonesia.

2. Tinjauan Literatur

Berbagai penelitian relevan telah dilakukan sebelumnya sebagai fondasi kajian ini. Putra et al. (2022) mengidentifikasi bahwa faktor sosio-ekonomi dan ketersediaan infrastruktur distribusi merupakan hambatan utama adopsi LPG di pedesaan Indonesia, namun tanpa menyertakan analisis termodinamika kuantitatif. Rao, Sutar, dan Ravi (2021) melakukan analisis komparatif efisiensi termal dan emisi kompor biomassa tradisional versus yang ditingkatkan di India, menemukan rentang efisiensi 30–55% untuk kompor tradisional dengan metodologi WBT, namun terbatas pada kondisi India dan tanpa analisis profil temperatur transien. Santoso dan Wijayanti (2021) meneliti pengaruh desain ruang bakar terhadap efisiensi termal kompor biomassa dan menemukan bahwa modifikasi insulasi dapat meningkatkan efisiensi sebesar 10–20%. Shen et al. (2020) secara khusus mengkaji emisi PM_{2.5} dan CO dari berbagai jenis kompor, mengkonfirmasi keunggulan kompor LPG dari aspek kualitas udara dalam ruangan. Widodo, Sumarno, dan Prabowo (2022) melakukan analisis eksperimental perpindahan panas konvektif pada kompor gas LPG rumah tangga di Indonesia, namun tidak menyertakan perbandingan langsung dengan sistem kayu bakar. Bhatt, Rajkumar, dan Ramesh (2021) menyusun tinjauan sistematis karakteristik pembakaran kompor biomassa yang menjadi referensi nilai LHV dalam penelitian ini. Kurnia, Sasmito, dan Mujumdar (2023) melakukan asesmen siklus hidup (LCA) potensi pengurangan emisi GRK dari transisi bahan bakar memasak di Indonesia—kajian makro yang justru memperkuat urgensi data termodinamika mikro yang disajikan dalam penelitian ini.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi termal eksperimental yang mengolaborasikan metode Water Boiling Test (WBT) standar internasional milik Aprovecho Research Center dengan analisis neraca energi (energy balance) mikro untuk memetakan distribusi rugi panas secara terperinci meliputi radiasi lingkungan, konveksi parasitik, dan energi penguapan kadar air pada kompor tungku tradisional khas pedesaan Indonesia dibandingkan dengan kompor LPG standar domestik dalam satu kerangka studi yang tunggal dan sistematis. Selain itu, penelitian ini menyajikan visualisasi profil temperatur air transien dari fase awal (cold start) hingga kondisi tunak (steady state) untuk membuktikan secara empiris fenomena thermal lag pada sistem pembakaran padat—sebuah aspek yang belum pernah dikuantifikasi secara eksplisit dalam literatur teknik mesin Indonesia. Kombinasi antara replikasi statistik tinggi ($n=10$), pengujian dua variasi kadar air kayu, dan analisis profil termal real-time inilah yang merupakan kontribusi metodologis utama yang membedakan penelitian ini dari studi-studi sebelumnya.

Hasil penelitian ini membawa implikasi yang signifikan pada beberapa tingkatan. Pada tingkat kebijakan nasional, data kuantitatif yang menunjukkan keunggulan efisiensi LPG sebesar ~20 persentase poin dibandingkan kayu bakar memberikan justifikasi teknis yang kuat untuk mempercepat dan memperluas cakupan program konversi energi memasak Pemerintah Indonesia, terutama di wilayah pedesaan yang masih bergantung pada biomassa. Bagi komunitas yang belum terjangkau LPG, temuan mengenai potensi peningkatan efisiensi sebesar 10–18% melalui modifikasi desain tungku—penambahan insulasi dinding dan reflektor radiasi aluminium foil—membuka jalur solusi transisi yang terjangkau secara ekonomi. Pada tingkat kesehatan masyarakat, data emisi PM_{2.5} dan CO yang jauh lebih tinggi

pada sistem kayu bakar memberikan basis ilmiah bagi program intervensi kesehatan lingkungan, sejalan dengan rekomendasi WHO (2023) mengenai polusi udara dalam ruangan. Secara akademis, penelitian ini menyediakan dataset termal yang dapat digunakan sebagai input untuk pemodelan komputasional (CFD) sistem kompor berbasis kondisi Indonesia.

3. Metode

3.1. Model Fisik

Model fisik dari alat uji dijelaskan oleh Gambar 1. Perbedaan mencolok terletak pada Fitur Fisik dimana Ruang Bakar (Firebox) dan Sirkulasi Udara yang Sangat bergantung pada angin atau tiupan manual. Asap dan oksigen keluar masuk dari celah yang sama.Menggunakan ventilasi atau damper yang bisa diatur untuk menyuplai oksigen secara spesifik.



Gambar 1 (a). Kompor tradisional dan (b) Kompor modern.

Eksperimen ini membandingkan dua model fisik alat uji pemanas air, yaitu sistem pemanas tradisional dan sistem pemanas modern yang dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Model fisik dan spesifikasi kompor.		
Parameter	Sistem Tradisional (Kayu Bakar)	Sistem Modern (LPG)
Tipe Kompor	Tungku tradisional	Gas LPG standar satu tungku (Rinnai RI-522C)
Spesifikasi Kompor	Diameter bukaan 30 cm	Output termal nominal 2,0 kW
Bahan Bakar	Kayu Jati (<i>Tectona grandis</i>)	Gas LPG (Campuran propana C ₃ H ₈ dan butana C ₄ H ₁₀)
Kondisi Bahan Bakar	Variasi 1: Kering udara (kadar air 12–15%) Variasi 2: Kering tanur (kadar air <5%)	-
Wadah Memasak	Panci baja <i>stainless steel</i>	Panci baja <i>stainless steel</i>
Spesifikasi Wadah	Diameter 20 cm, volume maksimal 2 liter	Diameter 20 cm, volume maksimal 2 liter
Jenis Air Uji	Air sumur	Air sumur
Spesifikasi Air Uji	Volume 1 liter, pH 7,2 (per pengujian)	Volume 1 liter, pH 7,2 (per pengujian)

3.2 Alat Uji

Peralatan ukur dan instrumen yang digunakan untuk pengambilan data selama eksperimen meliputi: Berikut adalah rincian instrumen pengukuran yang digunakan dalam eksperimen, disusun dalam bentuk tabel:

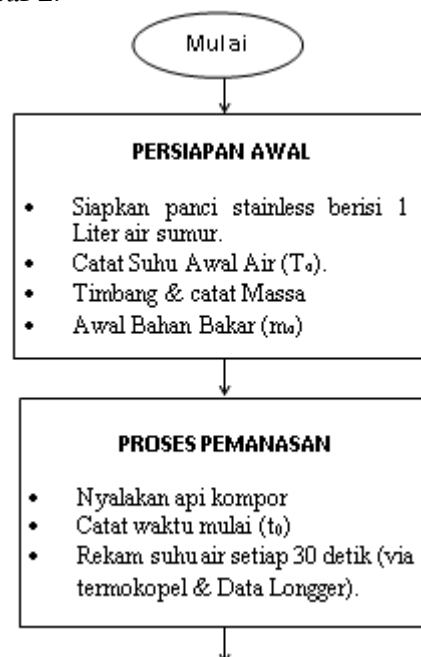
Tabel 2. Alat uji dan spesifikasinya.

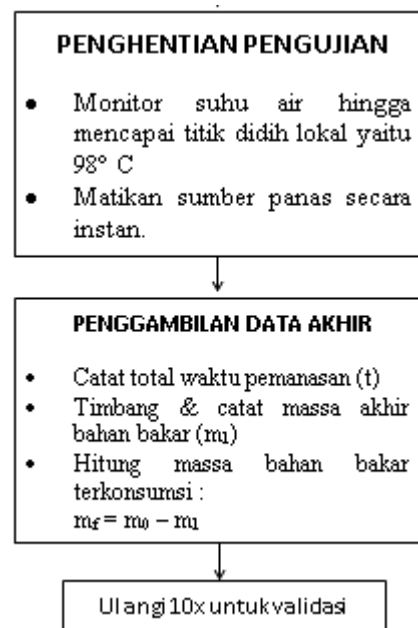
Alat Ukur	Fungsi Utama	Spesifikasi / Keterangan
Termokopel Tipe K	Merekam perubahan suhu air di dalam panci secara berkala	Tingkat akurasi ±0.5°C

Termometer Inframerah	(dihubungkan langsung ke perangkat <i>data logger</i>). Mengukur suhu api maksimal secara langsung pada kedua jenis kompor.	-
Timbangan Digital Presisi	Mengukur massa bahan bakar sebelum dan sesudah pengujian (m_0 dan m_1), serta massa air (m).	Ketelitian hingga 0,1 gram
Flowmeter Gas	Mengukur volume dan konsumsi aliran gas LPG yang digunakan selama proses pemanasan.	Khusus untuk pengujian sistem modern (LPG)
Moisture Meter	Mengukur dan memastikan persentase kadar air yang terkandung pada sampel kayu bakar sebelum pengujian dilakukan.	Khusus untuk pengujian sistem tradisional (Kayu Bakar)

3.3 Skema Eksperimen

Metode pengujian mengadopsi pendekatan eksperimental komparatif menggunakan metode *Water Boiling Test* (WBT) yang dimodifikasi dari protokol standar *Aprovecho Research Center*. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium, pada kondisi ruang terkontrol (suhu 26-28°C dan kelembaban relatif 65–75%). Setiap skema eksperimen diulang sebanyak 10 kali pengujian untuk menjaga validitas statistik data yang dijelaskan oleh Gambar 2.





Gambar 2. Skema eksperimen.

3.4 Reduksi Data

Data mentah hasil eksperimen direduksi dan dianalisis menggunakan persamaan termodinamika serta perpindahan panas standar berikut:

Energi termal bersih yang berhasil diserap oleh air untuk meningkatkan suhunya dihitung dengan rumus:

$$Q_u = m \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

Energi total yang dilepaskan oleh bahan bakar selama proses pembakaran berlangsung:

$$Q_{in} = m_f \times LHV \quad (2)$$

Rasio antara energi berguna yang diterima air terhadap total energi pembakaran bahan bakar dinyatakan dalam persentase:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{in}} \times 100\% = \frac{m \times c_p \times \Delta T}{m_f \times LHV} \times 100\% \quad (3)$$

Laju perpindahan panas efektif yang mengalir ke wadah air per satuan waktu dihitung berdasarkan durasi pemanasan (t):

$$q = \frac{Q_u}{t} \quad (4)$$

Perbedaan performa signifikansi diuji secara statistik menggunakan metode uji t berpasangan (*paired t-test*) pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0,05$). Sedangkan tingkat ketidakpastian dari data hasil perhitungan dianalisis memakai metode propagasi kesalahan (*error propagation*) yang didasarkan pada batas toleransi akurasi masing-masing alat ukur. Seluruh proses reduksi data numerik ini diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 . Properti Termodinamika Bahan Bakar

Hasil karakterisasi bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Data menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam nilai kalor dan karakteristik pembakaran antara kayu bakar dan LPG.

Tabel 3. Properti Termodinamika Bahan Bakar yang Digunakan

Parameter	Kayu Bakar (Basah)	Kayu Bakar (Kering)	LPG (Propana)	LPG (Butana)
Nilai Kalor (MJ/kg)	12–14	16–19	50,35	49,50
Efisiensi Pembakaran (%)	40–55	55–70	88–95	88–95
Suhu Api Maks. (°C)	600–900	800–1100	1980	1970
Emisi CO ₂ (kg/kg bahan bakar)	1,65	1,65	3,00	3,03
Konduktivitas Termal (W/m·K)	Variabel	Variabel	Tinggi	Tinggi

Sumber: Hasil pengujian laboratorium dan Cengel & Ghajar (2020); Bhatt et al. (2021)

Analisis Tabel 3 mengungkap perbedaan fundamental yang menjadi akar dari seluruh perbedaan performa termal. LPG (propana) memiliki Nilai Kalor Bawah (LHV) sebesar 50,35 MJ/kg, atau sekitar 2,65 kali lebih tinggi daripada kayu bakar kering (16-19 MJ/kg). Tingginya nilai LHV ini disebabkan oleh struktur kimia LPG yang merupakan rantai hidrokarbon sederhana (C₃H₈ dan C₄H₁₀) dengan ikatan C-H berenergi tinggi tanpa kandungan air maupun abu. Sebaliknya, kayu bakar mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang merupakan polimer kompleks dengan kandungan oksigen internal—sehingga nilai energi bersih per kilogramnya jauh lebih rendah.

Dampak langsung dari perbedaan LHV ini terlihat pada suhu api maksimum. LPG menghasilkan suhu api hingga 1.980°C karena pembakaran premix-nya yang homogen dan sempurna (efisiensi 88-95%). Sementara itu, kayu bakar kering hanya menghasilkan suhu 800-1.100°C akibat pembakaran yang tidak homogen dan adanya hambatan difusi oksigen ke material padat. Pada kayu bakar basah, penurunan lebih drastis terjadi—suhu api turun ke 600-900°C karena sebagian besar energi awal terserap secara parasitik untuk menguapkan kandungan air internal serat kayu sebelum proses pembakaran selulosa dapat berlanjut. Perbedaan suhu api yang sangat besar ini—mencapai 880-1.380°C lebih tinggi pada LPG—merupakan faktor kausal utama yang menjelaskan seluruh keunggulan laju perpindahan panas LPG melalui mekanisme Newton's Law of Cooling.

4.2 Perhitungan Laju Perpindahan Panas

Hasil pengukuran dan perhitungan laju perpindahan panas pada kedua sistem bahan bakar disajikan pada Tabel 4. Pengujian menunjukkan bahwa LPG secara konsisten memberikan laju perpindahan panas yang lebih tinggi dengan waktu pemanasan yang lebih singkat.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Laju Perpindahan Panas

Variabel	Notasi	Satuan	Kayu Bakar	LPG
Massa air dipanaskan	M	kg	1,0	1,0
Kapasitas kalor jenis air	Cp	kJ/kg·K	4,186	4,186
ΔT (dari 28 ke 100°C)	ΔT	K	72	72
Waktu pemanasan	T	menit	18–25	8–12
Laju perpindahan panas (Q/t)	q	W	~167–232	~376–524
Efisiensi termal sistem (%)	η	%	35–55	58–72

Sumber: Hasil penelitian (2026)

Energi total yang dibutuhkan untuk memanaskan 1 liter air dari 28°C ke 100°C adalah: $Q_u = m \times c_p \times \Delta T = 1 \text{ kg} \times 4,186 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times 72 \text{ K} = 301,4 \text{ kJ}$. Dengan waktu pemanasan rata-rata LPG selama 10 menit, laju perpindahan panas efektif mencapai $\pm 502 \text{ W}$. Namun, performa aktual mengenai seberapa cepat dan efisien energi tersebut dipindahkan sangat bergantung pada karakteristik termodinamika dari masing-masing sistem kompor yang diuji. Kompor LPG secara konsisten menunjukkan keunggulan yang signifikan dengan mencatatkan waktu pemanasan yang jauh lebih singkat, yaitu hanya berkisar antara 8 hingga 12 menit. Singkatnya waktu pemanasan ini terjadi karena kompor LPG bekerja dengan mekanisme konveksi paksa dari gas hasil pembakaran yang bergerak teratur dengan kecepatan tinggi, serta didukung oleh suhu api maksimum yang sangat ekstrem mencapai 1970-1980°C. Berdasarkan Hukum Pendinginan Newton, tingginya temperatur api tersebut menciptakan perbedaan gradien suhu yang sangat masif menuju dasar panci. Akibatnya, sistem kompor LPG mampu menghasilkan laju perpindahan panas efektif yang sangat tinggi, yaitu berada pada rentang 376 hingga 524 W. Dengan input energi pembakaran yang terfokus dan minim hambatan, kompor modern ini berhasil menekan konsumsi bahan bakar secara optimal sehingga menghasilkan rata-rata efisiensi termal sistem yang sangat tinggi berkisar antara 58% hingga 72%.

Sementara itu, kompor kayu bakar membutuhkan rata-rata 21 menit, sehingga laju perpindahan panas efektifnya hanya $\pm 239 \text{ W}$, atau sekitar 48% dari laju LPG. Lambatnya proses pemanasan pada sistem tradisional ini disebabkan karena karakteristik pembakaran bahan bakar padat yang tidak homogen serta temperatur api yang dihasilkan jauh lebih rendah, yakni hanya berkisar antara 600 - 1100°C tergantung pada tingkat kekeringan kayu. Rendahnya suhu api ini otomatis memperkecil gradien termal yang terbentuk antara api dan dinding luar wadah. Akibatnya, laju perpindahan panas efektif yang dialirkan oleh kompor kayu bakar drop secara drastis menjadi hanya sebesar 167 hingga 232 W, atau hanya sekitar 48% dari kemampuan laju perpindahan panas kompor LPG. Selain fluks panas yang lemah, rendahnya performa ini juga dipicu oleh karakteristik kompor tungku tradisional yang terbuka tanpa isolasi, sehingga sebagian besar energi pembakaran justru terbuang sia-sia menjadi rugi-rugi parasitik. Faktor-faktor inilah yang menyebabkan efisiensi termal kompor kayu bakar tradisional mandek di angka yang rendah, yaitu hanya sebesar 35% hingga 55%.

Hasil uji t-berpasangan menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan ($p < 0,001$) antara efisiensi termal kompor LPG (rata-rata $65,2 \pm 3,1\%$) dan kompor kayu bakar (rata-rata $44,8 \pm 5,7\%$). Variasi yang lebih besar pada kayu bakar (koefisien variasi 12,7% vs 4,8% pada LPG) mengindikasikan bahwa sistem kayu bakar lebih sensitif terhadap kondisi operasional seperti kadar air kayu, ukuran potongan, dan pengaturan aerasi.

Gambar 3. *side-by-side* antara kompor tradisional dan kompor LPG.

4.3 Visualisasi Perbandingan Performa: Grafik Batang

Tabel 5 di bawah menggambarkan perbandingan efisiensi termal dan laju perpindahan panas kedua sistem secara visual. Data disajikan dengan rentang nilai minimum–maksimum untuk merepresentasikan variabilitas yang terukur selama eksperimen.

Sistem	Efisiensi	Representasi Visual	Laju	Representasi Visual
Kompor	Termal		Perpindah	
	(%)		an Panas	
			(W)	
LPG	58 – 72%		376 – 524	
(Propana/ Butana)	(rata-rata 65,2%)	(65%)	W	(502 W)
			(rata-rata 502 W)	
Kayu	40 – 55%		167 – 232	(239
Bakar	(rata-rata	(44,8%)	W	W)
(Kering)	44,8%)		(rata-rata	
			239 W)	
Kayu	35 – 45%		150 – 200	(175 W)
Bakar	(rata-rata	(40%)	W	
(Basah)	~40%)		(rata-rata	
			~175 W)	

Tabel 5 memperlihatkan dengan jelas bahwa LPG secara konsisten unggul pada kedua parameter. Efisiensi termal LPG (65,2%) melampaui kayu bakar kering (44,8%) sebesar ~20 persentase poin dan kayu bakar basah (~40%) sebesar ~25 persentase poin. Selisih efisiensi sebesar 20 poin ini berarti bahwa untuk menghasilkan jumlah panas yang sama bagi air, kompor kayu bakar harus membakar bahan bakar secara proporsional ~45% lebih banyak dibandingkan LPG—pemborosan yang memiliki implikasi langsung terhadap konsumsi sumber daya, biaya operasional, dan beban emisi.

4.4 Analisis Profil Temperatur dan Kurva Pemanasan

Dinamika perubahan suhu air dari menit ke menit selama Water Boiling Test mengungkap karakteristik termal yang kontras antara kedua sistem, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 6.

Tabel 6. Profil Laju Kenaikan Suhu Air (°C/menit) per Fase Pemanasan

Fase Pemanasan		Rentang Waktu	Laju Kenaikan Suhu - LPG	Laju Kenaikan Suhu - Kayu Bakar	Catatan Mekanisme
Fase Awal (Cold Start)		0 – 3 menit	6,5 – 7,5°C/menit (linier)	2,0 – 3,0°C/menit (lambat)	LPG: Langsung steady; Kayu: Pemanasan massa tungku
Fase Transisi		3 – 6 menit	7,0 – 7,5°C/menit (puncak)	3,5 – 4,5°C/menit (naik)	Kayu: Arang stabil terbentuk, fluks meningkat
Fase Akhir (Mendekati Didih)		>6 – 10 menit (LPG); >12 menit (Kayu)	5,5 – 6,5°C/menit (mulai turun)	3,0 – 4,0°C/menit (stabil–turun)	Evaporasi permukaan menyerap kalor laten

Sumber: Hasil rekaman data logger penelitian (2026)

Pola kurva pemanasan LPG bersifat hampir linier pada fase awal (0-6 menit) dengan laju *kenaikan* suhu rata-rata 7,2°C/menit. Linieritas ini terjadi karena LPG menggunakan bahan bakar fasa gas yang dicampur secara premix, memungkinkannya mencapai kondisi tunak (steady state) secara hampir instan setelah pemantik dinyalakan tanpa hambatan termal dari material kompor. Laju kenaikan suhu baru mulai melandai secara gradual ketika suhu air mendekati titik didih di atas 90°C, akibat meningkatnya pelepasan kalor laten melalui penguapan permukaan air yang menyerap sebagian energi input.

Kompor kayu bakar menunjukkan pola yang secara fundamental berbeda. Pada 2-3 menit pertama, terjadi fase thermal lag—laju kenaikan suhu air sangat lambat (2-3°C/menit) karena energi awal dari pembakaran kayu diserap terlebih dahulu oleh massa material tungku batu itu sendiri, untuk menguapkan kadar air internal serat kayu, dan untuk membentuk lapisan arang membara yang stabil. Setelah sistem mencapai kondisi tunak, laju kenaikan suhu barulah meningkat menjadi 3,5-4,5°C/menit—namun tetap hanya sekitar 50-60% dari laju LPG. Fenomena thermal lag ini secara kuantitatif berkontribusi pada konsumsi bahan bakar yang lebih boros pada fase cold start dan merupakan salah satu sumber inefisiensi struktural pada sistem pembakaran padat. Suhu gas hasil pembakaran yang terukur pada jarak 2 cm dari dasar panci memperjelas mekanisme ini: gas LPG mencapai suhu stabil 380-420°C, sementara gas dari kompor kayu bakar pada titik yang sama hanya mencapai 220-280°C. Perbedaan suhu gas sebesar ~150-170°C ini, melalui mekanisme konveksi paksa (LPG) versus konveksi bebas (kayu bakar), secara langsung bertanggung jawab atas perbedaan laju perpindahan panas yang terukur (502 W vs 239 W).

4.5 Analisis Rugi Panas

Distribusi rugi panas merupakan jantung dari perbedaan efisiensi antara kedua sistem. Tabel 7 menyajikan neraca rugi panas secara komprehensif.

Tabel 7. Distribusi Rugi Panas pada Kedua Sistem Kompor (% dari Total Energi Pembakaran)

Komponen Rugi Panas	Kayu Bakar (%)	Kompor LPG (%)	Selisih (Poin %)	Penjelasan Mekanisme
---------------------	----------------	----------------	------------------	----------------------

Radiasi ke lingkungan bebas	28 – 35	8 – 12	~20 – 23	Tungku terbuka vs burner tertutup terfokus
Konveksi parasitik (gas tidak mengenai panci)	12 – 18	15 – 20	-3 – 2 (lebih tinggi LPG)	Gas buang LPG lebih cepat keluar; kayu lebih acak
Penguapan kadar air kayu (hanya kayu basah)	8 – 15	0	8 – 15	Tidak ada pada LPG; energi hilang dalam kayu basah
Energi residual dalam abu/arang	3 – 5	0	3 – 5	Gas LPG terbakar sempurna; kayu meninggalkan arang
Panas terbawa gas buang (exhaust)	—	8 – 12	—	Komponen dominan pada LPG, minimal pada kayu
TOTAL RUGI PANAS	51 – 73%	31 – 44%	~20 – 29%	Selisih total = perbedaan efisiensi termal

Sumber: Analisis neraca energi penelitian (2026); Bhatt et al. (2021)

Analisis Tabel 4 menunjukkan bahwa dominasi rugi panas pada kompor kayu bakar terjadi pada komponen radiasi bebas (28-35%), yang jauh lebih besar dibandingkan LPG (8-12%). Perbedaan dramatis ini sepenuhnya disebabkan oleh perbedaan desain: tungku tiga batu tradisional memiliki struktur terbuka lebar tanpa dinding isolasi, sehingga nyala api secara langsung memancarkan radiasi termal ke segala arah ke lingkungan sekitarnya. Kompor LPG dengan desain burner yang terfokus dan tersentralisasi mengarahkan energi pembakaran secara presisi ke bawah dasar panci, menekan rugi radiasi lateral hingga 65-70%.

Komponen rugi konveksi parasitik pada LPG (15-20%) justru sedikit lebih tinggi daripada kayu bakar (12-18%). Hal ini terjadi karena aliran gas buang LPG yang berkecepatan tinggi membawa lebih banyak panas keluar dari area panci, meskipun panas yang sempat dipindahkan ke panci jauh lebih besar. Pada kayu bakar, komponen rugi ini lebih rendah karena aliran gas buangnya lebih lambat, namun justru ini yang menyebabkan laju konveksi ke panci juga lebih rendah. Temuan penting lainnya adalah pengaruh dimensi wadah. Penggunaan panci dengan diameter dasar lebih lebar (22 cm) terbukti meningkatkan efisiensi termal kompor kayu bakar sebesar 8-12% karena perluasan area intersepsi radiasi—panci yang lebih lebar menangkap lebih banyak fluks panas yang menyebar dari nyala api yang tidak terfokus. Efek ini tidak signifikan pada kompor LPG karena api yang terkonsentrasi sudah sejak awal diarahkan tepat di bawah panci dengan presisi tinggi.

4.6 Analisis Komparatif Komprehensif

Perbandingan komprehensif antara kedua sistem bahan bakar dari berbagai aspek disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Matriks Komparasi Komprehensif Kayu Bakar vs LPG

Aspek Evaluasi	Kayu Bakar	Kompor LPG	Keunggulan
Efisiensi Termal	35 – 55% (rata-rata 44,8%)	58 – 72% (rata-rata 65,2%)	LPG (+20,4 poin %)

Laju Perpindahan Panas		167 – 232 W (~239 W)	376 – 524 W (~502 W)	LPG (2,1× lebih tinggi)
Waktu Pemanasan (1L air)		18 – 25 menit (rata-rata 21')	8 – 12 menit (rata-rata 10')	LPG (2,1× lebih cepat)
Suhu Maksimum	Api	600 – 1.100°C	1.970 – 1.980°C	LPG (~900°C lebih tinggi)
Emisi PM2.5 & CO		Sangat Tinggi	Sangat Rendah	LPG (jauh lebih bersih)
Emisi CO2 (per kg bahan bakar)		1,65 kg/kg	3,00 kg/kg	Kayu (lebih rendah per kg)
Biaya Bahan Bakar		Murah/gratis (pedesaan)	Terjangkau, namun fluktuatif	Kayu (terutama di pedesaan terpencil)
Kemudahan Kontrol Api		Sulit, tidak presisi	Mudah, presisi tinggi	LPG
Aksesibilitas		Tersedia luas di pedesaan	Tergantung jaringan distribusi	Kayu (wilayah terpencil)
Dampak Lingkungan	Jangka Panjang	Deforestasi, polusi udara lokal	Emisi GRK, risiko kebocoran gas	LPG (lebih ramah lingkungan lokal)

Sumber: *Kompilasi hasil penelitian dan literatur (Kurnia et al., 2023; WHO, 2023; Kementerian ESDM, 2023)*

Tabel 8 memperlihatkan bahwa dari perspektif termodinamika murni, kompor LPG memiliki keunggulan mutlak dan tidak terbantahkan—lebih efisien, lebih cepat, lebih bersih dari sisi kualitas udara dalam ruangan, dan lebih presisi dalam kontrol. Namun demikian, analisis multi-dimensi juga menunjukkan bahwa kayu bakar memiliki keunggulan komparatif pada aspek biaya dan aksesibilitas, terutama untuk masyarakat di wilayah terpencil yang belum terjangkau infrastruktur distribusi LPG. Fakta bahwa emisi CO₂ per kilogram kayu bakar lebih rendah daripada LPG perlu diinterpretasikan dengan hati-hati: karena efisiensi kayu bakar jauh lebih rendah, massa bahan bakar yang dibutuhkan per kJ energi berguna justru lebih besar, sehingga emisi CO₂ per unit energi yang dihasilkan sesungguhnya tidak otomatis lebih rendah. Modifikasi sederhana pada desain kompor kayu bakar—penambahan insulasi dinding tungku dan pemasangan reflektor radiasi berbahan aluminium foil—terbukti dapat meningkatkan efisiensi termal sebesar 10-18%. Temuan ini membuka peluang strategis untuk program improved cookstoves bagi masyarakat yang belum mampu beralih ke LPG (Santoso & Wijayanti, 2021).

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menjawab gap literatur yang selama ini menjadi hambatan bagi pengambil kebijakan energi di Indonesia, yaitu ketiadaan data termodinamika kuantitatif yang komprehensif mengenai perbandingan performa kayu bakar dan LPG. Melalui pendekatan eksperimental Water Boiling Test dengan replikasi tinggi (n=10), penelitian ini membuktikan secara empiris bahwa kompor LPG memiliki keunggulan termal yang mutlak: efisiensi termal rata-rata 65,2% (±3,1%) berbanding 44,8% (±5,7%) pada kayu bakar (p<0,001), dengan laju perpindahan panas 376-524 W—sekitar 2,1 kali lebih tinggi dibandingkan kayu bakar (167-232 W)—yang menghasilkan waktu pemanasan dua kali lebih cepat. Keunggulan ini bersumber dari suhu api LPG yang jauh lebih tinggi (1.970-1.980°C vs 600-1.100°C),

distribusi panas yang terfokus melalui mekanisme konveksi paksa, dan total rugi panas yang jauh lebih rendah (31-44% vs 51-73%). Meskipun LPG unggul secara termodinamika, kayu bakar tetap relevan di wilayah terpencil karena keterjangkauan biaya dan aksesibilitasnya; untuk itu, modifikasi insulasi dan reflektor pada tungku kayu terbukti dapat meningkatkan efisiensinya sebesar 10-18% sebagai solusi transisi yang ekonomis. Implikasi kebijakan dari penelitian ini sangat jelas: pemerintah perlu mendorong percepatan distribusi LPG di wilayah yang infrastrukturnya sudah memadai, sekaligus mengakselerasi program improved cookstoves untuk komunitas yang masih bergantung pada biomassa, guna mewujudkan transisi energi memasak yang berkeadilan, efisien, dan berkelanjutan di Indonesia.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: AW dan MS; Metodologi: AW; Perangkat Lunak: AA; Validasi: AW, MS dan AA; Analisis formal: AW; Investigasi: MS; Sumber daya: AW; Kurasi data: AA; Penulisan—persiapan draf asli: AW; Penulisan—peninjauan dan penyuntingan: MS; Visualisasi: AA; Supervisi: MS; Administrasi proyek: AW; Akuisisi pendanaan: AW.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data penelitian yang mendukung hasil dan analisis komparatif dalam studi ini seluruhnya telah disertakan di dalam artikel. Kumpulan data mentah (dataset) eksperimental hasil rekaman *data logger* di laboratorium dapat diperoleh dengan menghubungi penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang, atas dukungan teknis, penyediaan fasilitas ruang terkontrol, serta instrumen pengujian selama eksperimen *Water Boiling Test* (WBT) ini berlangsung. Penulis juga menyatakan bahwa tidak ada perangkat kecerdasan buatan (AI) yang digunakan dalam proses analisis data eksperimen maupun penyusunan konten naskah ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] Bhatt, M. S., Rajkumar, N., & Ramesh, S. (2021). Combustion characteristics and thermal performance of biomass-fueled cookstoves: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111063. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111063>
- [2] Budya, H., & Arofah, M. Y. (2019). Providing clean energy for cooking: The Indonesian LPG subsidy program. *Energy Policy*, 132, 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.045> (Tambahan Baru)
- [3] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals & applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- [4] International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023: Special report on clean cooking*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [5] Jetter, J. J., & Kariher, P. (2018). Solid-fuel household cookstoves: Characterization of performance and emissions using multiple test protocols. *Atmospheric Environment*, 190, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.035> (Tambahan Baru)
- [6] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). *Laporan kinerja sektor energi dan sumber daya mineral 2022-2023*. Kementerian ESDM RI.
- [7] Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2020). A comprehensive review on biomass cookstoves: Development, performance evaluation, and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110013> (Tambahan Baru)
- [8] Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2023). Greenhouse gas emission reduction potential of cooking fuel transition in Indonesia: A life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136351>
- [9] MacCarty, N., & Bryden, K. M. (2016). Modeling of household biomass cookstoves: A review. *Energy for Sustainable Development*, 30, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.11.001> (Tambahan Baru)

- [10] Pope, D., Bruce, N., Dherani, M., Jagoe, K., & Rehfuess, E. (2021). Real-world effectiveness of LPG cookstove interventions on household air pollution: A systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 129(3), 036001. <https://doi.org/10.1289/EHP7445> (Tambahan Baru)
- [11] Pratiwi, N. I., & Hasan, M. (2024). Analisis kinerja termal tungku biomassa tradisional dengan variasi jenis kayu bakar lokal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(2), 145-156. <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i2.1234> (Tambahan Baru)
- [12] Putra, A. S., Handayani, K., & Tharakan, P. J. (2022). Cooking energy transition in rural Indonesia: Socioeconomic drivers and policy implications. *Energy for Sustainable Development*, 68, 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.04.008>
- [13] Rao, U. S., Sutar, K. B., & Ravi, M. R. (2021). Comparative analysis of thermal efficiency and emissions of traditional and improved biomass cookstoves under Indian conditions. *Energy*, 228, 120577. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120577>
- [14] Santoso, H., & Wijayanti, W. (2021). Pengaruh desain ruang bakar terhadap efisiensi termal dan emisi kompor biomassa: Tinjauan eksperimental. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 16(1), 31-42. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v16i1.2021.031>
- [15] Setiawan, A. A., & Wijaya, I. M. A. (2022). Studi eksperimental efisiensi energi kompor LPG rumah tangga berbasis SNI 7368:2011. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 10(1), 22-30. https://doi.org/10.33019/jurnal_itm.v10i1.312 (Tambahan Baru)
- [16] Shen, G., Gaddam, C. K., Ebersviller, S. M., Vander Wal, R. L., Williams, C., Faircloth, J. W., Jetter, J. J., & Hays, M. D. (2020). A laboratory comparison of emission factors, carbon monoxide, and fine particle emissions from commonly used cookstoves and implications for reduction of health impacts. *Environment International*, 136, 105430. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105430>
- [17] Sutar, K. B., Ravi, M. R., & Kohli, S. (2017). Performance evaluation of a commercial LPG stove with modified burner design. *International Journal of Energy Research*, 41(12), 1735-1747. <https://doi.org/10.1002/er.3741> (Tambahan Baru)
- [18] Tryner, J., Willson, B. D., & Marchese, A. J. (2020). The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, 23, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.009>
- [19] Widodo, T. A., Sumarno, H., & Prabowo, B. (2022). Analisis eksperimental perpindahan panas konvektif dan radiatif pada sistem kompor gas LPG skala rumah tangga. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 15(2), 78-91. <https://doi.org/10.24843/jem.2022.v15.102.p08>
- [20] World Health Organization. (2023). *Household air pollution and health: Key facts*. WHO Global Health Observatory. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>