KARAKTERISTIK TERMAL INSULASI ROCKWOOL PADA RUANG BAKAR KOMPOR MINYAK JELANTAH

Moh Rafli[1], Miko Maulana[1], Muhammad Daffa Rahfi[1], Totok Widiyanto[1*]
[1]Program Studi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315, Indonesia
**E-mail*: totokwidiyanto67@gmail.com

ABSTRAK

Kompor minyak jelantah menghasilkan suhu ruang bakar tinggi sehingga memerlukan insulasi termal demi keselamatan pengoperasian. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik termal insulasi *rockwool* setebal 2,0–2,5 cm dengan konduktivitas termal 0,033–0,040 W/m·°C pada ruang bakar silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 11 cm. Data berasal dari enam pengujian *Water Boiling Test*, yaitu tiga replikasi bahan bakar tanpa filtrasi dan tiga replikasi bahan bakar terfiltrasi, dengan suhu dinding ruang bakar dan suhu *cover* diukur setiap dua menit pada empat sisi memakai *thermo gun* inframerah. Pada menit ke-14, efektivitas insulasi rata-rata mencapai 26,4±1,1% pada bahan bakar tanpa filtrasi dan 29,2±0,2% pada bahan bakar terfiltrasi, dengan selisih suhu dinding-*cover* 44,8 °C dan 52,3 °C. Suhu *cover* tertinggal 27–58 °C dari suhu dinding sepanjang pengujian (*thermal lag*), tetapi tetap mencapai 120–131 °C sehingga belum aman disentuh langsung. Perhitungan hukum Fourier menunjukkan konduksi *rockwool* hanya menyumbang sekitar 0,05% kehilangan panas total, konsisten dengan dominasi konveksi dan radiasi. Secara praktis, pengembangan kompor yang lebih aman memerlukan tambahan ketebalan insulasi atau lapisan pelindung luar.

Kata kunci: insulasi *rockwool*; *thermal lag*; efektivitas insulasi; hukum Fourier; kompor minyak jelantah

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan rumah tangga dan pelaku usaha kuliner skala kecil terhadap *liquefied petroleum gas* (LPG) bersubsidi, di sisi lain besarnya volume minyak jelantah yang terbuang dari aktivitas memasak sehari-hari, mendorong pengembangan kompor alternatif berbahan bakar minyak jelantah sebagai salah satu solusi energi domestik yang lebih berkelanjutan [1]. Purwarupa kompor pada penelitian ini dirancang dengan tiga komponen utama yang terintegrasi, yaitu sistem penyaluran bahan bakar melalui konfigurasi *drip-vaporizer*, sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit untuk memperbaiki mutu minyak jelantah, dan insulasi termal *rockwool* pada ruang bakar silinder, sejalan dengan berbagai purwarupa kompor jelantah yang telah dilaporkan sebelumnya [2]. Pengaruh filtrasi zeolit terhadap kinerja termal kompor, termasuk efisiensi dan konsumsi bahan bakar, dibahas secara khusus pada kajian pendamping yang menggunakan dataset pengujian yang sama; artikel ini memfokuskan pembahasan pada karakteristik termal insulasi ruang bakar, yang konfigurasinya dipertahankan tetap pada kedua kondisi bahan bakar tersebut.

Ruang bakar silinder pada purwarupa ini beroperasi pada suhu dinding yang cukup tinggi, terukur mencapai kisaran 300–390 °C, sejalan dengan karakteristik suhu pembakaran minyak jelantah yang relatif tinggi sebagai bahan bakar cair [3]. Tanpa penghalang termal, suhu permukaan luar kompor yang setinggi itu berisiko menimbulkan luka bakar pada operator serta mempercepat degradasi material rangka. Material *rockwool* dipilih sebagai insulasi berdasarkan pertimbangan konduktivitas termal yang rendah (0,033–0,040 W/m·°C), ketahanan terhadap suhu tinggi hingga sekitar 650–750 °C, dan sifat tidak mudah terbakar dibandingkan alternatif

seperti *glass wool* maupun *polyurethane foam* yang kurang sesuai untuk aplikasi bersuhu tinggi [4].

Berbeda dengan kompor LPG konvensional yang umumnya memakai *burner* terbuka dengan campuran gas dan udara yang mudah terbakar, kompor minyak jelantah berbasis *drip-vaporizer* menuntut ruang bakar tertutup yang dijaga tetap panas agar minyak yang kental dan bertitik didih tinggi dapat menguap sebelum terbakar; pada purwarupa ini ruang bakar bahkan harus dipanaskan awal hingga minimal 250 °C sebelum aliran minyak dibuka. Batasan operasional tersebut menimbulkan dilema desain: panas harus tertahan di dalam ruang bakar demi penguapan dan pembakaran yang stabil, sementara suhu permukaan luar kompor harus tetap serendah mungkin demi keselamatan pengguna. Insulasi dinding ruang bakar menjadi komponen kunci untuk menyeimbangkan kedua tuntutan tersebut.

Studi Akbar dan Kurniawan pada kompor briket berinsulasi *mineral wool* setebal 4 cm melaporkan suhu permukaan *cover* pada kisaran 35–52 °C [5], jauh lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa insulasi. Kajian lain oleh Hernandez-Estrada dkk. yang meninjau material insulasi ruang bakar kompor kayu bakar di Meksiko Selatan dan Amerika Tengah menegaskan bahwa material berkonduktivitas termal rendah seperti *mineral wool* (0,035–0,039 W/m·°C) jauh lebih unggul dibandingkan material insulasi tradisional berbasis limbah, seperti abu kayu (0,10–0,20 W/m·°C) maupun batu apung (sekitar 0,4 W/m·°C), yang umum digunakan di wilayah dengan keterbatasan akses material insulasi komersial [6]. Sementara itu, pendekatan gabungan antara perhitungan teoretis berbasis hukum perpindahan panas dan pengukuran eksperimental pada kompor biomassa terbukti bermanfaat untuk menguraikan kontribusi masing-masing mekanisme perpindahan panas terhadap kinerja kompor secara keseluruhan [7]. Ketebalan insulasi 2,0–2,5 cm menjadi fokus karena sesuai dengan dimensi kompor yang ringkas (ruang bakar Ø10 cm dengan *cover* 25 cm) dan ketersediaan bahan: penelitian ini memakai *rockwool* yang tersedia di bengkel mekanik dengan ketebalan tersebut. Ketebalan ini lebih tipis daripada insulasi 4 cm pada studi pembanding [5], sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi acuan awal untuk menilai apakah ketebalan tersebut sudah memadai dari sisi keselamatan atau perlu ditingkatkan.

Meskipun efektivitas insulasi *rockwool* maupun *mineral wool* pada berbagai konfigurasi kompor telah dilaporkan, kajian yang secara eksplisit menguraikan perilaku insulasi dalam domain waktu, yaitu fenomena *thermal lag* atau jeda respons suhu permukaan terhadap perubahan suhu ruang bakar, sekaligus menguji keseragaman spasial pada empat sisi *cover* dan memvalidasi kontribusi konduksi terhadap kehilangan panas total menggunakan hukum Fourier pada satu purwarupa kompor berskala kecil, masih terbatas jumlahnya. Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah seberapa besar efektivitas insulasi *rockwool* setebal rata-rata 2,2 cm dalam menurunkan suhu permukaan ruang bakar kompor minyak jelantah, bagaimana profil suhu dan *thermal lag cover* terhadap suhu dinding ruang bakar, serta seberapa besar kontribusi konduksi melalui *rockwool* terhadap kehilangan panas total. Pertanyaan tersebut penting dijawab karena suhu permukaan yang terlalu tinggi mengancam keselamatan pengguna kompor rumah tangga. Jawabannya juga menentukan apakah ketebalan insulasi pada purwarupa perlu ditingkatkan atau pengendalian kehilangan panas sebaiknya diarahkan ke mekanisme lain.

Penelitian ini bertujuan (1) mengukur profil suhu dinding ruang bakar (T_{RB}) dan *cover* terinsulasi (T_{cv}) terhadap waktu selama 20 menit; (2) menghitung efektivitas insulasi (ε_{ins}) pada menit ke-14 sebagai kondisi pembakaran relatif stabil; (3) mengkuantifikasi *thermal lag* sebagai selisih T_{RB} dan T_{cv} terhadap waktu beserta keseragamannya pada empat sisi *cover*; dan (4) memvalidasi kontribusi konduksi melalui *rockwool* terhadap kehilangan panas total menggunakan hukum Fourier dengan konduktivitas termal nominal *rockwool*. Data suhu pada kedua kondisi bahan bakar, tanpa filtrasi (K) dan terfiltrasi (P), dianalisis bersama sebagai dua rezim intensitas pembakaran untuk menguji konsistensi kinerja insulasi, bukan sebagai variabel

perlakuan utama. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar penentuan ketebalan dan konfigurasi insulasi yang aman bagi kompor minyak jelantah skala rumah tangga.

Naskah ini disusun dalam lima bab sesuai pedoman penulisan SNTEM. Bab 1 menguraikan latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan penelitian, sedangkan Bab 2 menjelaskan metode pengujian dan analisis data. Bab 3 membahas profil suhu, efektivitas insulasi, *thermal lag*, dan validasi hukum Fourier, Bab 4 memuat simpulan dan saran, dan Bab 5 memuat daftar pustaka.

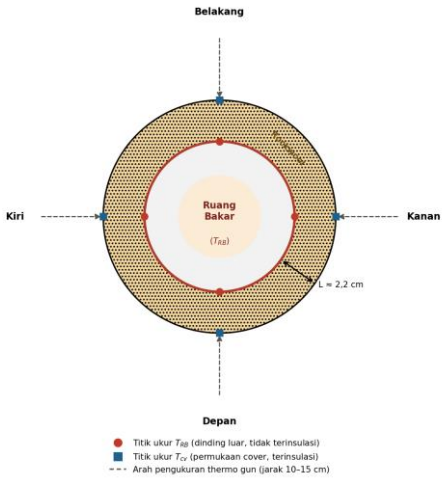
2. METODE

Penelitian ini menggunakan purwarupa kompor berbahan bakar minyak jelantah dengan ruang bakar berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 11 cm, terbuat dari pipa besi, yang dibungkus insulasi termal *rockwool* dengan tebal rata-rata 2,2 cm di sepanjang keliling vertikalnya. Konfigurasi insulasi ini bersifat tetap dan identik pada seluruh pengujian; variasi bahan bakar antara kondisi tanpa filtrasi (K) dan terfiltrasi (P), yang menjadi fokus kajian filtrasi zeolit pada artikel pendamping, pada penelitian ini diperlakukan sebagai dua rezim intensitas pembakaran untuk menilai konsistensi kinerja insulasi. Ringkasan konfigurasi pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Pengujian dan Spesifikasi Insulasi

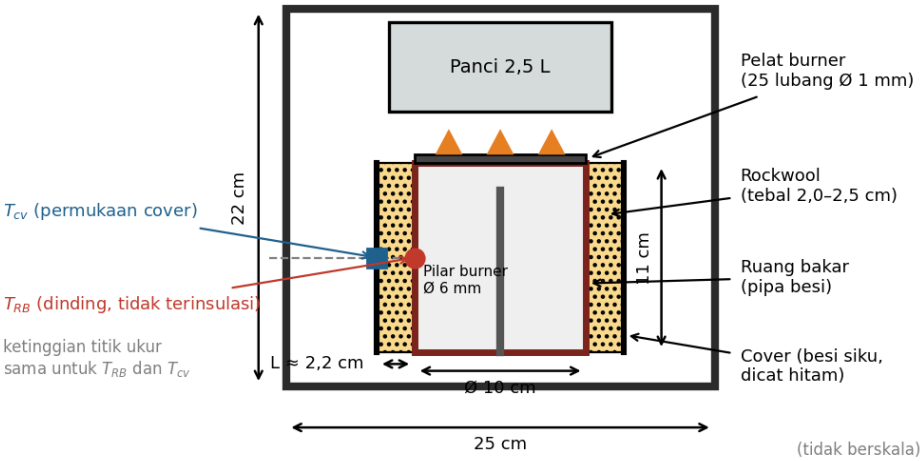
Parameter	Nilai
Diameter ruang bakar	10 cm
Tinggi ruang bakar	11 cm
Tebal insulasi *rockwool*	2,0–2,5 cm (rata-rata 2,2 cm)
Massa jenis *rockwool*	100 kg/m³
Konduktivitas termal *rockwool* (k)	0,033–0,040 W/m·°C
Volume air uji	2,5 L
Volume bahan bakar per pengujian	700 mL
Durasi pengujian	20 menit
Interval pencatatan data	2 menit (11 titik waktu)
Jumlah replikasi	3 per kondisi (total 6 pengujian)
Instrumen suhu	*Thermo gun* inframerah, rentang -50 s.d. 550 °C, akurasi ±2 °C

Setiap pengujian mengikuti pendekatan *Water Boiling Test* (WBT) menggunakan 2,5 L air dan 700 mL bahan bakar, dinyalakan dengan bantuan 50 mL spiritus untuk pemanasan awal ruang bakar hingga mencapai suhu minimal 250 °C sebelum aliran minyak jelantah dibuka melalui *ball valve* [8]. Pengujian berlangsung 20 menit dengan pencatatan data setiap 2 menit (menit ke-0, 2, 4, ..., 20), menghasilkan sebelas titik waktu per pengujian, mengikuti interval pencatatan berkala yang umum diterapkan pada standardisasi metode WBT untuk kompor berbahan bakar cair [9]. Pada setiap titik waktu, suhu diukur pada tiga lokasi: permukaan air di tengah panci, dinding luar ruang bakar yang tidak terinsulasi (T_{RB}), dan permukaan luar *cover* yang terinsulasi *rockwool* (T_{cv}). Khusus untuk T_{RB} dan T_{cv}, pengukuran dilakukan pada empat sisi (depan, kanan, kiri, belakang) menggunakan *thermo gun* inframerah pada jarak 10–15 cm dari permukaan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. *Thermo gun* dikalibrasi pada emisivitas $\varepsilon \approx 0{,}95$ dan diverifikasi pada titik acuan 0 °C serta 100 °C dengan toleransi ±1 °C sebelum pengujian dimulai.



Gambar 1. Skema Penampang Ruang Bakar, Lapisan Insulasi *Rockwool*, dan Titik Pengukuran Empat Sisi

Rockwool yang digunakan berupa *blanket* (*wire mesh blanket*) lembaran dengan massa jenis 100 kg/m³ dan konduktivitas termal nominal 0,033–0,040 W/m·°C. Merek dan *datasheet* pabrikan tidak tersedia sehingga nilai k nominal mengacu pada literatur [4], [10]. *Rockwool* membungkus keliling vertikal pipa besi ruang bakar dengan tebal 2,0–2,5 cm (rata-rata 2,2 cm), dan nilai k nominal tersebut umumnya ditetapkan pada suhu rata-rata yang rendah serta dipakai apa adanya pada Pers. (3) tanpa koreksi terhadap suhu operasi. Titik ukur T_{RB} dan T_{cv} berada pada empat sisi (depan, kanan, kiri, belakang) pada satu garis radial (Gambar 1) dan pada ketinggian yang sama (Gambar 2), serta diukur dengan *thermo gun* dari jarak 10–15 cm, sehingga ΔT pada setiap sisi mewakili beda suhu pada posisi yang sama. Penampang samping ruang bakar berukuran diameter 10 cm dan tinggi 11 cm, lengkap dengan susunan *rockwool* dan *cover*, ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan contoh pengambilan data suhu dengan *thermo gun* saat pengujian berlangsung ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Penampang Samping Ruang Bakar Berinsulasi *Rockwool* dan Posisi Titik Ukur



Gambar 3. Pengambilan Data Suhu Menggunakan Thermo Gun Inframerah pada Pengujian Kompor

Analisis data mencakup tiga besaran turunan. Selisih suhu dinding (ΔT) dihitung dari selisih rata-rata empat sisi T_{RB} dan T_{cv} pada setiap titik waktu sesuai Pers. (1). Efektivitas insulasi (ε_{ins}) dihitung sebagai proporsi ΔT terhadap T_{RB} sesuai Pers. (2). Menit ke-14 dipilih sebagai acuan kondisi pembakaran relatif stabil untuk perbandingan efektivitas antar pengujian, karena pada titik waktu tersebut laju kenaikan suhu dinding ruang bakar pada seluruh pengujian telah melandai dibandingkan fase transien pada menit-menit awal.

$$\Delta T = T_{\mathrm{RB}} - T_{\mathrm{cv}} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{ins}} = \frac{\Delta T}{T_{\mathrm{RB}}} \times 100\% \tag{2}$$

Validasi teoretis terhadap kontribusi konduksi *rockwool* pada kehilangan panas total dilakukan menggunakan persamaan konduksi satu dimensi hukum Fourier kondisi tunak [10]:

$$\mathrm{q} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \tag{3}$$

dengan q laju perpindahan panas konduksi (W), k konduktivitas termal *rockwool* (W/m·°C), A luas perpindahan panas keliling silinder ruang bakar (A = π×D×H), ΔT selisih suhu dinding pada menit ke-14, dan L tebal insulasi (m). Karena tebal insulasi (2,2 cm) tidak kecil dibandingkan jari-jari ruang bakar (5 cm), asumsi dinding datar pada Pers. (3) diuji kepekaannya menggunakan persamaan konduksi radial silinder [10]:

$$\mathrm{q} = \frac{2\pi k H \Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \tag{4}$$

dengan H tinggi ruang bakar (0,11 m), r_1 jari-jari dalam (0,05 m), dan r_2 jari-jari luar insulasi (r_1 + L = 0,072 m).

Mengingat setiap kondisi hanya direplikasi tiga kali, analisis statistik dibatasi pada statistik deskriptif berupa rata-rata dan simpangan baku (*mean* ± *standard deviation*, SD) tanpa uji hipotesis inferensial. Simpangan baku dilaporkan pada dua tingkat, yaitu antar-replikasi (tiga

pengujian per kondisi) dan antar-empat-sisi pengukuran dalam satu pengujian. Mengingat akurasi *thermo gun* sebesar ±2 °C, perbedaan yang bernilai lebih kecil daripada akurasi tersebut diinterpretasikan secara proporsional, bukan sebagai bukti presisi yang tidak didukung instrumen.

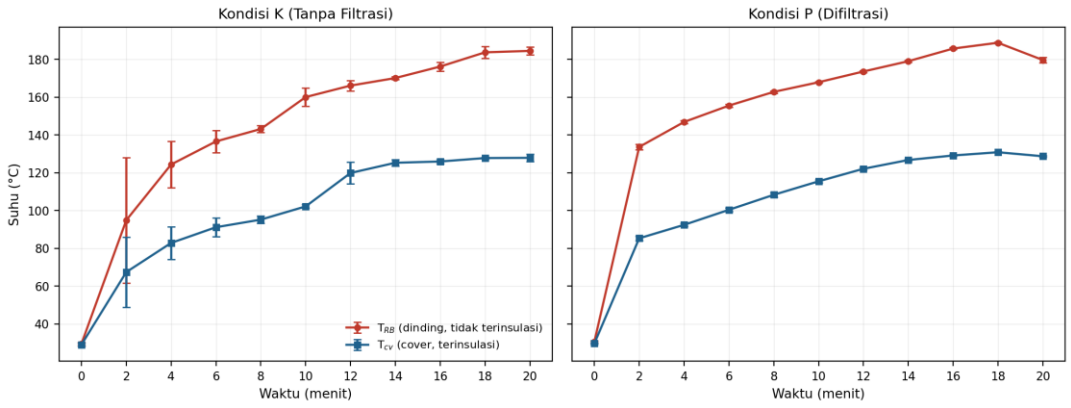
3. PEMBAHASAN

A. Profil Suhu Dinding Ruang Bakar dan Cover Terinsulasi

Profil suhu T_{RB} dan T_{cv} rata-rata pada kedua kondisi disajikan pada Tabel 2 dan diinterpretasikan pada Gambar 4. Setiap nilai pada tabel merupakan rata-rata tiga replikasi beserta simpangan baku antar-replikasi. Kolom K menunjukkan bahan bakar tanpa filtrasi dan kolom P menunjukkan bahan bakar terfiltrasi.

Tabel 2. Profil Suhu Dinding Ruang Bakar Tidak Terinsulasi (T_{RB}) dan *Cover* Terinsulasi (T_{cv}), *Mean*±SD Antar-Replikasi

Menit	T_{RB} K (°C)	T_{cv} K (°C)	T_{RB} P (°C)	T_{cv} P (°C)
0	29,4±0,8	28,9±0,7	30,5±0,6	29,6±0,4
2	94,9±33,1	67,4±18,5	133,7±1,4	85,3±1,1
4	124,4±12,2	82,8±8,6	146,9±0,9	92,4±0,7
6	136,6±5,9	91,2±4,9	155,5±0,8	100,4±1,0
8	143,2±1,9	95,2±1,9	162,8±0,7	108,3±1,1
10	160,1±4,8	102,2±0,9	167,9±0,4	115,5±0,7
12	166,1±2,8	119,9±5,8	173,6±0,5	122,1±0,7
14	170,1±0,8	125,3±1,6	179,0±0,4	126,8±0,6
16	176,2±2,3	126,0±1,1	185,7±0,6	129,1±0,3
18	183,7±3,1	127,8±0,5	188,8±0,3	130,8±0,3
20	184,5±2,1	127,9±2,0	179,7±1,4	128,7±0,3



Gambar 4. Profil T_{RB} dan T_{cv} terhadap Waktu pada Kondisi K dan P (Bar Galat Menunjukkan SD Antar-Replikasi)

Pada kondisi K, suhu T_{RB} menit ke-2 menunjukkan variasi antar-replikasi yang sangat besar (94,9±33,1 °C), dengan K-1 mencapai 133,1 °C sementara K-2 dan K-3 baru mencapai 75,3 °C dan 76,2 °C. Pola ini konsisten dengan ketidakstabilan aliran bahan bakar tidak terfiltrasi pada fase awal pembakaran, sebagaimana diuraikan pada kajian pendamping berbasis data suhu air. Pada kondisi P, sebaliknya, T_{RB} menit ke-2 antar-replikasi jauh lebih seragam (133,7±1,4 °C). Variasi antar-replikasi kondisi K berangsur mengecil memasuki menit ke-8

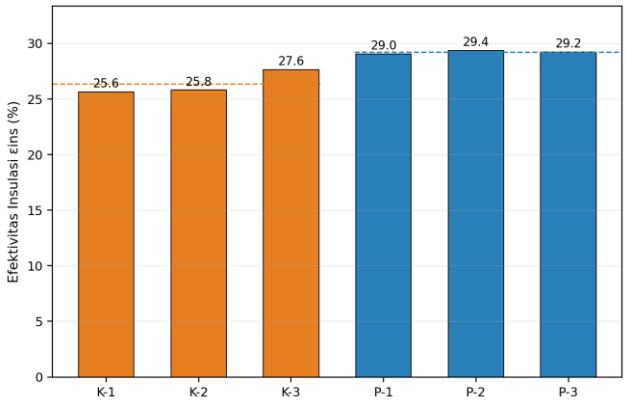
hingga ke-14, sejalan dengan tercapainya kestabilan nyala pada seluruh replikasi. Pola serupa turut teramati pada T_{cv}, dengan simpangan baku antar-replikasi 18,5 °C pada menit ke-2 kondisi K berbanding 1,1 °C pada kondisi P. Sekalipun bukan menjadi fokus utama artikel ini, pola tersebut memberikan bukti independen, diperoleh dari lokasi pengukuran yang berbeda dari data suhu air, bahwa filtrasi zeolit turut berasosiasi dengan keterulangan pembakaran yang lebih baik pada fase transien awal. Terlepas dari perbedaan keterulangan tersebut, kedua kondisi menunjukkan pola kualitatif yang sama: T_{cv} secara konsisten berada di bawah T_{RB} sepanjang durasi pengujian, dengan selisih yang melebar pada fase transien awal dan selanjutnya berfluktuasi pada kisaran sekitar 45–58 °C pada paruh akhir pengujian (menit ke-12 hingga ke-20). Kesamaan pola pada dua rezim intensitas pembakaran yang berbeda ini mengindikasikan bahwa perilaku termal insulasi *rockwool* tidak bergantung secara besar terhadap variasi suhu sumber panas pada rentang yang diuji.

B. Efektivitas Insulasi Rockwool

Efektivitas insulasi pada menit ke-14 untuk setiap pengujian disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 5. Menit ke-14 dipilih karena pembakaran pada seluruh pengujian telah relatif stabil. Nilai rata-rata dan simpangan baku dihitung dari tiga replikasi pada masing-masing kondisi.

Tabel 3. Efektivitas Insulasi pada Menit ke-14 (Kondisi Pembakaran Relatif Stabil)

Pengujian	T_{RB} (°C)	T_{cv} (°C)	ΔT (°C)	ε_{ins} (%)
K-1	170,3	126,7	43,7	25,6
K-2	169,3	125,6	43,7	25,8
K-3	170,8	123,6	47,2	27,6
Rata-rata K	170,1±0,7	125,3±1,6	44,8±2,0	26,4±1,1
P-1	179,5	127,4	52,1	29,0
P-2	178,6	126,2	52,4	29,4
P-3	179,1	126,8	52,3	29,2
Rata-rata P	179,0±0,4	126,8±0,6	52,3±0,2	29,2±0,2



Gambar 5. Perbandingan Efektivitas Insulasi (ε_{ins}) Kondisi K dan P per Pengujian

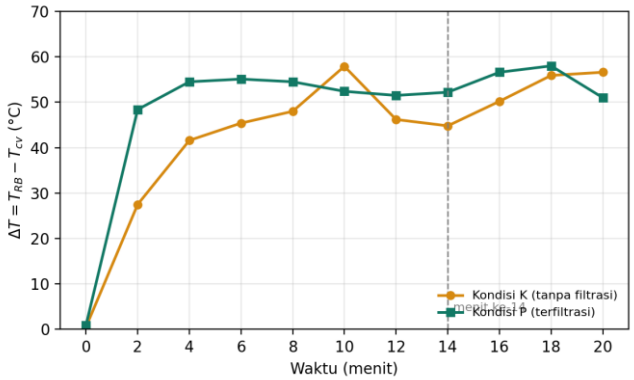
Efektivitas insulasi rata-rata mencapai 26,4±1,1% pada kondisi K dan 29,2±0,2% pada kondisi P, dengan ΔT dinding 44,8±2,0 °C dan 52,3±0,2 °C. Selisih ini terutama didorong oleh T_{RB} yang lebih tinggi pada kondisi P (179,0 °C berbanding 170,1 °C), sementara T_{cv} relatif berdekatan (126,8 °C berbanding 125,3 °C). Dengan kata lain, insulasi menahan proporsi panas yang sedikit lebih besar ketika suhu sumber panas lebih tinggi, konsisten dengan hubungan proporsional pada Pers. (2), bukan karena kondisi *rockwool* yang berbeda antar kedua kondisi bahan bakar. Simpangan baku suhu antar-empat-sisi *cover* pada menit ke-14, dihitung ulang

dari data mentah, rata-rata 0,20 °C pada kondisi K dan 0,21 °C pada kondisi P, menunjukkan pembacaan yang berdekatan pada keempat sisi. Meski demikian, nilai tersebut berada di bawah akurasi *thermo gun* (±2 °C), sehingga keseragaman spasial ini sebaiknya dimaknai sebagai indikasi pembacaan yang berdekatan pada keempat titik ukur, bukan sebagai bukti presisi mengenai ketiadaan *hot spot* yang melampaui kemampuan resolusi instrumen yang digunakan.

Dibandingkan dengan kompor briket berinsulasi *mineral wool* setebal 4 cm yang dilaporkan Akbar dan Kurniawan, dengan suhu *cover* 35–52 °C [5], suhu *cover* pada penelitian ini (120–131 °C, Tabel 2) jauh lebih tinggi. Selain perbedaan geometri ruang bakar dan sumber panas, tebal insulasi pada penelitian ini (2,2 cm) kurang dari separuh tebal pada studi pembanding tersebut, sejalan dengan hubungan berbanding terbalik antara tebal insulasi dan laju kehilangan panas konduksi pada Pers. (3). Perbandingan ini bersifat indikatif karena geometri, sumber panas, dan metode pengukuran kedua studi berbeda.

C. Fenomena Thermal Lag

Jeda respons suhu *cover* terhadap suhu dinding ruang bakar (*thermal lag*) teramati konsisten pada seluruh titik waktu setelah penyalaan (Tabel 2, Gambar 4). Pada menit ke-2, ketika T_{RB} kondisi P telah mencapai 133,7 °C, T_{cv} baru mencapai 85,3 °C, selisih 48,4 °C. Pada kondisi K, sekalipun T_{RB} rata-rata pada menit yang sama jauh lebih rendah (94,9 °C) akibat variasi antar-replikasi yang telah diuraikan, selisih T_{RB} dan T_{cv} tetap besar (27,5 °C). Pada menit ke-14, ketika pembakaran relatif stabil, selisih tersebut sebesar 44,8 °C (K) dan 52,3 °C (P), kemudian berfluktuasi pada kisaran 44,8–56,6 °C (K) dan 51,0–58,0 °C (P) hingga menit ke-20 (Gambar 6).



Gambar 6. Selisih Suhu Dinding Ruang Bakar dan *Cover* ($\Delta T = T_{RB} - T_{cv}$) terhadap Waktu pada Kondisi K dan P

Kapasitas termal *rockwool* bekerja menunda perambatan panas dari dinding ruang bakar ke permukaan luar, sehingga permukaan yang berpotensi tersentuh operator naik lebih lambat dan mencapai suhu puncak yang jauh lebih rendah dibandingkan dinding ruang bakar. Meski demikian, suhu T_{cv} pada penelitian ini tetap mencapai 120–131 °C pada menit-menit akhir pengujian (Tabel 2), jauh melampaui ambang luka bakar kontak pada kulit manusia. Dengan kata lain, *thermal lag* pada konfigurasi 2,2 cm ini efektif menunda dan meredam kenaikan suhu permukaan, tetapi belum menurunkannya ke rentang yang aman disentuh langsung tanpa alat pelindung.

D. Validasi Konduksi dengan Hukum Fourier

Validasi teoretis menggunakan Pers. (3) dengan k=0,040 W/m·°C, $A=\pi\times0{,}10\times0{,}11=0{,}0346$ m², L=0,022 m, dan ΔT=52,3 °C (kondisi P, menit ke-14) menghasilkan laju kehilangan panas konduksi q=3,29 W, atau setara 3,94 kJ selama durasi

pengujian 20 menit. Nilai ini hanya menyumbang sekitar 0,05% dari total *heat loss* pada kondisi P sebagaimana dilaporkan pada kajian pendamping (7.876,6 kJ), menegaskan bahwa konduksi melalui *rockwool* bukan jalur utama kehilangan panas sistem; mayoritas *heat loss* berasal dari konveksi gas buang dan radiasi nyala api yang lolos di sekeliling panci. Uji kepekaan terhadap asumsi dinding datar menggunakan konduksi radial silinder (Pers. (4) dengan r_1=0,05 m, r_2=0,072 m, H=0,11 m) menghasilkan q=3,97 W, atau 4,76 kJ selama 20 menit. Nilai ini sekitar 21% lebih besar daripada hasil Pers. (3), tetapi tetap hanya sekitar 0,06% dari total *heat loss*, sehingga kesimpulan bahwa konduksi melalui *rockwool* bukan jalur kehilangan panas yang dominan tidak bergantung pada pilihan model geometri.

Hal yang sama berlaku untuk ketidakpastian konduktivitas termal. Nilai k nominal *rockwool* umumnya ditetapkan pada suhu rata-rata rendah, sedangkan suhu rata-rata lapisan insulasi pada pengujian ini sekitar 153 °C, yaitu rata-rata T_{RB} (179,0 °C) dan T_{cv} (126,8 °C) kondisi P pada menit ke-14, dan konduktivitas efektif *rockwool* cenderung naik seiring suhu akibat meningkatnya perpindahan panas radiasi antar-serat dan konduksi gas di dalam pori. Karena q berbanding lurus dengan k, bahkan bila k efektif dua kali nilai nominal tertinggi (0,080 W/m·°C), kontribusi konduksi hanya meningkat menjadi sekitar 0,1% dari total *heat loss*.

Dominasi konveksi dan radiasi dapat dijelaskan dari tahanan termal masing-masing jalur. Jalur konduksi melalui dinding insulasi memiliki tahanan $R = L/(kA) = 0{,}022/(0{,}040 \times 0{,}0346) \approx 15{,}9$ °C/W, sehingga beda suhu 52,3 °C hanya mengalirkan sekitar 3,3 W. Sebaliknya, total *heat loss* kondisi P sebesar 7.876,6 kJ dalam 20 menit setara laju rata-rata sekitar 6,6 kW, yang terutama dilepaskan melalui jalur yang tidak melewati insulasi, yaitu gas buang yang keluar di sekeliling panci serta radiasi nyala dan permukaan panas yang terbuka. Jalur-jalur tersebut memiliki luas dan beda suhu yang jauh lebih besar dan tidak dibatasi tahanan insulasi. Dengan demikian, nilai 0,05% tidak berarti insulasi tidak bekerja; insulasi dinding samping hanya mengatur satu jalur kecil dengan fungsi utama menurunkan suhu permukaan, bukan menaikkan efisiensi termal.

Terkait kemungkinan celah udara atau pemasangan yang tidak sempurna, struktur serat *rockwool* pada massa jenis 100 kg/m³ umumnya menekan sirkulasi udara internal, sehingga konveksi alami di dalam pori kecil dibandingkan konduksi gas dan radiasi antar-serat; pengaruhnya baru signifikan pada insulasi berdensitas sangat rendah atau bila terdapat celah makroskopis. Lapisan tipis udara diam antara dinding dan *rockwool* justru menambah tahanan termal secara seri. Yang lebih berpotensi menaikkan suhu *cover* adalah celah pada sambungan dan tepi insulasi serta jembatan termal (misalnya rangka dan katup) yang membuka jalur *by-pass* bagi gas panas dan konduksi logam. Mekanisme ini tidak diukur pada penelitian ini sehingga masih berupa dugaan, dan verifikasinya memerlukan termografi atau termokopel yang ditanam di dalam lapisan insulasi. Perlu dicatat bahwa Pers. (3) dan Pers. (4) dihitung menggunakan ΔT terukur antara T_{RB} dan T_{cv} dengan asumsi kondisi tunak, padahal suhu muka dalam insulasi dapat berbeda dari T_{RB} dan pengujian berlangsung dalam kondisi transien. Nilai q karenanya diperlakukan sebagai estimasi orde besar untuk membandingkan jalur perpindahan panas, bukan sebagai pengukuran laju kehilangan panas yang presisi.

Temuan ini sejalan dengan pendekatan perhitungan teoretis-eksperimental pada kompor biomassa yang melaporkan bahwa perolehan energi terbesar berasal dari radiasi nyala dan bahan bakar, diikuti konveksi ke dasar dan sisi panci [7], serta memperkuat kesimpulan bahwa peningkatan ketebalan *rockwool* pada konfigurasi ini akan menekan suhu permukaan *cover* lebih jauh untuk kepentingan keselamatan, tetapi memberikan pengaruh terbatas terhadap efisiensi termal keseluruhan, yang lebih ditentukan oleh mekanisme konveksi dan radiasi di sekitar panci. Kombinasi *rockwool* dengan kerudung (*skirt*) panci untuk menekan *heat loss* konvektif-radiatif, sebagaimana disinggung pada kajian pendamping, menjadi arah optimasi yang lebih relevan untuk peningkatan efisiensi dibandingkan sekadar menambah tebal insulasi.

Pendekatan ini sekaligus menjaga fungsi insulasi sebagai pelindung keselamatan tanpa mengorbankan upaya peningkatan efisiensi.

4. SIMPULAN

Berdasarkan tujuan penelitian, diperoleh empat simpulan. Pertama, pada kedua kondisi bahan bakar, T_{cv} secara konsisten berada di bawah T_{RB} sepanjang pengujian, dan pola yang sama pada dua rezim intensitas pembakaran mengindikasikan bahwa kinerja insulasi tidak bergantung besar pada variasi suhu sumber panas dalam rentang yang diuji. Kedua, insulasi *rockwool* setebal rata-rata 2,2 cm menghasilkan efektivitas insulasi 26,4±1,1% pada kondisi tanpa filtrasi dan 29,2±0,2% pada kondisi terfiltrasi pada menit ke-14, dengan ΔT dinding-*cover* 44,8±2,0 °C dan 52,3±0,2 °C. Ketiga, *thermal lag* teramati jelas, dengan suhu *cover* tertinggal 27–58 °C di bawah suhu dinding ruang bakar sepanjang pengujian; pembacaan pada empat sisi *cover* berdekatan (simpangan baku sekitar 0,20 °C), tetapi nilai tersebut berada di bawah akurasi *thermo gun* sehingga tidak dapat dimaknai sebagai bukti ketiadaan *hot spot*. Keempat, validasi hukum Fourier menunjukkan bahwa konduksi melalui *rockwool* hanya berkontribusi sekitar 0,05% (0,06% pada model radial silinder) terhadap kehilangan panas total, sehingga konveksi dan radiasi mendominasi mekanisme kehilangan panas pada purwarupa ini. Meskipun demikian, suhu *cover* masih mencapai 120–131 °C sehingga belum tergolong aman disentuh langsung tanpa pelindung.

Secara umum, temuan ini sejalan dengan kajian material insulasi ruang bakar kompor berbahan bakar padat maupun cair yang menunjukkan bahwa material berkonduktivitas termal rendah seperti *rockwool* atau *mineral wool* jauh lebih efektif menahan panas dibandingkan material insulasi tradisional [4], [5], [6], meskipun suhu *cover* yang dicapai pada penelitian ini masih lebih tinggi dibandingkan konfigurasi insulasi yang lebih tebal pada studi pembanding. Agar memenuhi standar keselamatan kompor rumah tangga, disarankan: (1) meningkatkan tebal *rockwool* menjadi 4–5 cm, sebagaimana disarankan pada kajian pendamping berdasarkan konfigurasi insulasi *mineral wool* pada studi terdahulu [5], yang berpotensi menurunkan suhu *cover* ke rentang yang lebih aman disentuh; (2) menambahkan lapisan pelindung luar, misalnya selubung logam berventilasi dengan celah udara terhadap *cover*, agar permukaan yang dapat tersentuh tidak berhubungan langsung dengan insulasi bersuhu 120–131 °C; (3) merapatkan sambungan dan tepi insulasi serta meminimalkan jembatan termal; (4) memverifikasi suhu permukaan menggunakan termokopel tertanam atau termografi pada seluruh permukaan *cover*; dan (5) menambahkan kerudung panci untuk menekan *heat loss* konvektif-radiatif demi meningkatkan efisiensi termal purwarupa secara keseluruhan. Dengan demikian, seluruh tujuan penelitian terjawab dan arah perbaikan desain ruang bakar menjadi jelas.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Nusantara, F. Aditya, dan G. Pratama, “Kompor minyak jelantah: Kinerja dan keberlanjutan dalam pemanasan air rumah tangga,” *Jurnal Energi dan Lingkungan*, vol. 13, no. 1, pp. 56–64, 2024.

[2] R. Andika, B. Setiawan, dan M. Yusuf, “Analisis efisiensi termal kompor berbahan bakar minyak jelantah satu tungku,” *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, vol. 16, no. 3, pp. 78–86, 2024.

[3] F. Fatin, “Studi karakteristik termal minyak jelantah sebagai bahan bakar cair,” *Jurnal Energi dan Lingkungan*, vol. 12, no. 1, pp. 12–20, 2024.

[4] PT Aneka Isolasi, “Perbedaan glasswool, rockwool, dan polyurethane foam: Mana yang terbaik untuk insulasi?,” Aneka Isolasi. https://anekaisolasi.com/perbedaan-glasswool-rockwool-dan-polyurethane-foam-mana-yang-terbaik-untuk-insulasi/. Diakses: 11 Jun. 2026.

[5] M. Akbar dan A. Kurniawan, “Pengukuran efisiensi termal kompor briket berinsulasi mineral wool,” *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 18, no. 1, pp. 34–42, 2026.

[6] E. N. Hernandez-Estrada, J. B. Robles-Ocampo, P. Y. Sevilla-Camacho, M. A. Zúñiga Reyes, R. A. González Domínguez, dan J. Rodriguez-Resendiz, "Experimental thermal study of the materials used in the construction of combustion chamber of firewood stoves in Southern Mexico and Central America," *Thermo*, vol. 6, no. 1, Art. no. 8, 2026.
[7] H. Atajafari, B. R. Pathak, dan R. Bhandari, "Thermal performance evaluation of a single-mouth improved cookstove: Theoretical approach compared with experimental data," *Energies*, vol. 17, no. 17, Art. no. 4355, 2024.
[8] T. Jalil, A. Wijaya, dan S. Hidayat, "Pengaruh campuran spiritus terhadap karakteristik pembakaran," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 4, pp. 200–208, 2024.
[9] N. Fatin, R. Sari, dan B. Pranata, "Standardisasi metode water boiling test untuk kompor berbahan bakar cair," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 7, no. 2, pp. 101–110, 2024.
[10] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

Daftar Simbol

A	=	Luas perpindahan panas keliling silinder ruang bakar, m^2
D	=	Diameter ruang bakar, m
H	=	Tinggi ruang bakar, m
k	=	Konduktivitas termal rockwool, W/m·°C
L	=	Tebal insulasi, m
q	=	Laju perpindahan panas konduksi, W
r_1	=	Jari-jari dalam (ruang bakar), m
r_2	=	Jari-jari luar insulasi, m
T_{RB}	=	Suhu dinding ruang bakar tidak terinsulasi, °C
T_{cv}	=	Suhu permukaan cover terinsulasi, °C
ΔT	=	Selisih suhu dinding dan cover ($T_{RB} - T_{cv}$), °C
ε_{ins}	=	Efektivitas insulasi, %