Pengaruh Filtrasi Zeolit terhadap Kinerja Termal Kompor Minyak Jelantah

Miko Maulana[1], Muhammad Daffa Rahfi[1*], Moh Rafli[1], Totok Widiyanto[1]

[1] Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Indonesia

ABSTRAK

Pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan bakar kompor terkendala viskositas dan kandungan pengotor yang tinggi sehingga mengganggu kestabilan pembakaran. Penelitian ini menganalisis pengaruh filtrasi berlapis berbasis zeolit terhadap karakteristik pemanasan air pada prototipe kompor *drip-vaporizer* minyak jelantah. Pengujian dengan pendekatan *Water Boiling Test* membandingkan minyak tanpa filtrasi (K) dan minyak terfiltrasi (P), masing-masing dengan tiga replikasi selama 20 menit. Berdasarkan suhu air yang diukur langsung, kondisi P mencapai suhu puncak 97,33±0,15 °C dan suhu ≥95 °C pada menit ke-12 secara konsisten pada seluruh replikasi, sedangkan kondisi K mencapai 95,90±0,17 °C dan suhu ≥95 °C dalam 15,3±1,2 menit dengan variasi antarreplikasi yang lebih besar. Energi yang diserap air meningkat dari 731,85 menjadi 745,11 kJ, tetapi selisih suhu puncak dan energi ini berada dalam ketidakpastian instrumen ukur (±2 °C). Efisiensi termal, SFC, dan *heat loss* dihitung dari estimasi konsumsi bahan bakar sehingga hanya bersifat indikatif dan tidak disimpulkan sebagai perbaikan yang terukur. Filtrasi zeolit tampak berkontribusi pada pencapaian suhu ≥95 °C yang lebih cepat dan profil pemanasan yang lebih seragam pada prototipe dan kondisi pengujian ini, meskipun sebagian variasi kondisi K berasal dari perbedaan kondisi awal ruang bakar; validasi dengan pengukuran konsumsi bahan bakar secara langsung dan karakterisasi kimia minyak masih diperlukan.

Kata Kunci: Filtrasi zeolit, Keterulangan, Kinerja termal, Minyak jelantah, *Water boiling test*

mdaffarahfi@gmail.com

1. Pendahuluan

Konsumsi *liquefied petroleum gas* (LPG) bersubsidi sebagai bahan bakar utama rumah tangga dan usaha kuliner skala kecil di Indonesia terus meningkat, membebani anggaran subsidi energi nasional [1]. Pada saat yang sama, limbah minyak goreng bekas atau minyak jelantah dihasilkan dalam jumlah besar oleh rumah tangga dan pelaku usaha kuliner, dan sebagian besar dibuang langsung ke saluran air atau tanah sehingga mencemari lingkungan [2]. Kondisi ini membuka peluang pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan bakar alternatif kompor rumah tangga, sekaligus sebagai jalur pengurangan limbah; kajian mengenai kinerja dan keberlanjutan kompor minyak jelantah untuk pemanasan air rumah tangga turut menunjukkan potensi tersebut [3].

Minyak jelantah masih menyimpan nilai kalor yang relatif tinggi, sekitar 39,5 MJ/kg atau setara dengan 94% nilai kalor solar, sehingga secara energetik layak dipertimbangkan sebagai bahan bakar cair pengganti sebagian LPG [4]. Namun demikian, pemanfaatan langsung minyak jelantah pada kompor menghadapi kendala teknis. Proses penggorengan berulang meningkatkan viskositas minyak akibat polimerisasi asam lemak, serta meninggalkan kandungan asam lemak bebas dan partikel padat sisa penggorengan yang mengganggu atomisasi pada sistem *drip-vaporizer*

dan menurunkan kestabilan nyala api [5]. Kajian kompor minyak jelantah satu tungku tanpa perlakuan bahan bakar melaporkan efisiensi termal pada kisaran 10,03–10,41% [6], sementara desain *burner* dengan variasi jumlah lubang dan pengaturan aliran udara terbukti berpengaruh terhadap kestabilan pembakaran [7]. Pengembangan sistem *drip-vaporizer* dengan *blower* udara juga telah dilaporkan mampu menghasilkan nyala biru yang relatif stabil [8].

Filtrasi menggunakan adsorben zeolit alam merupakan salah satu pendekatan *pretreatment* yang banyak dikaji untuk memperbaiki mutu minyak jelantah sebelum dibakar. Struktur pori zeolit yang berukuran molekuler memberikan kapasitas adsorpsi tinggi terhadap molekul polar seperti air dan asam lemak bebas [9], dan penelitian terdahulu melaporkan filtrasi zeolit mampu menurunkan kadar asam lemak bebas hingga 58% serta bilangan peroksida hingga 47,6% pada minyak jelantah [10]. Pendekatan filtrasi berlapis, yang mengombinasikan penyaringan mekanis dan adsorpsi bertingkat, dilaporkan lebih efektif dibandingkan filtrasi media tunggal karena mampu menangani rentang ukuran pengotor yang lebih luas [11].

Dibandingkan adsorben lain, zeolit dipilih pada penelitian ini berdasarkan tiga pertimbangan. Pertama, adsorben yang umum digunakan untuk memurnikan minyak nabati, seperti karbon aktif, bentonit, dan zeolit, memberikan hasil yang berbeda yaitu pada pemurnian minyak jagung, zeolit dan bentonit memberikan efek yang lebih baik daripada karbon aktif terhadap kejernihan, warna, dan kadar asam lemak bebas [12]. Kedua, zeolit alam tersedia di dalam negeri, murah, dan mudah diperoleh, misalnya zeolit Bayah di Banten, sehingga sesuai untuk teknologi tepat guna skala rumah tangga [13]. Ketiga, zeolit berbentuk butiran dapat dikemas sebagai unggun diam yang dialiri minyak secara gravitasi tanpa pompa dan tanpa tahap pemisahan adsorben setelah kontak, berbeda dengan adsorben serbuk halus yang umumnya dicampurkan ke dalam minyak lalu disaring. Pertimbangan ketiga ini bersifat rekayasa desain dan tidak diuji secara komparatif pada penelitian ini. Dari sisi kinerja, penelitian internasional terbaru melaporkan bahwa sistem adsorpsi bertingkat berbasis beberapa jenis zeolit sintetis menurunkan kadar air, angka asam, bilangan peroksida, dan viskositas minyak goreng bekas [14], sedangkan perlakuan bahan bakar sebelum pembakaran, yaitu pemanasan awal untuk menurunkan viskositas, terbukti meningkatkan efisiensi kompor berbahan bakar minyak bekas [15]. Penelitian ini tidak membandingkan zeolit dengan adsorben lain secara eksperimental sehingga pemilihan zeolit didasarkan pada pertimbangan tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, sejumlah kajian terdahulu telah membahas pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan bakar kompor dan efektivitas zeolit sebagai adsorben secara terpisah, tetapi kajian yang secara langsung membandingkan kinerja termal kompor yang sama antara kondisi bahan bakar tanpa filtrasi dan bahan bakar hasil filtrasi berlapis berbasis zeolit, pada prototipe dan kondisi pengujian yang terkendali, belum banyak ditemukan. Insulasi termal *rockwool* pada ruang bakar turut digunakan pada prototipe penelitian ini, tetapi konfigurasinya dibuat tetap pada seluruh pengujian sehingga bukan merupakan variabel yang dianalisis. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit terhadap karakteristik pemanasan air dan kinerja termal kompor minyak jelantah, melalui pengujian dengan pendekatan *Water Boiling Test* pada dua kondisi bahan bakar, tanpa filtrasi (K) dan terfiltrasi (P), masing-masing tiga kali replikasi pada prototipe kompor yang identik.

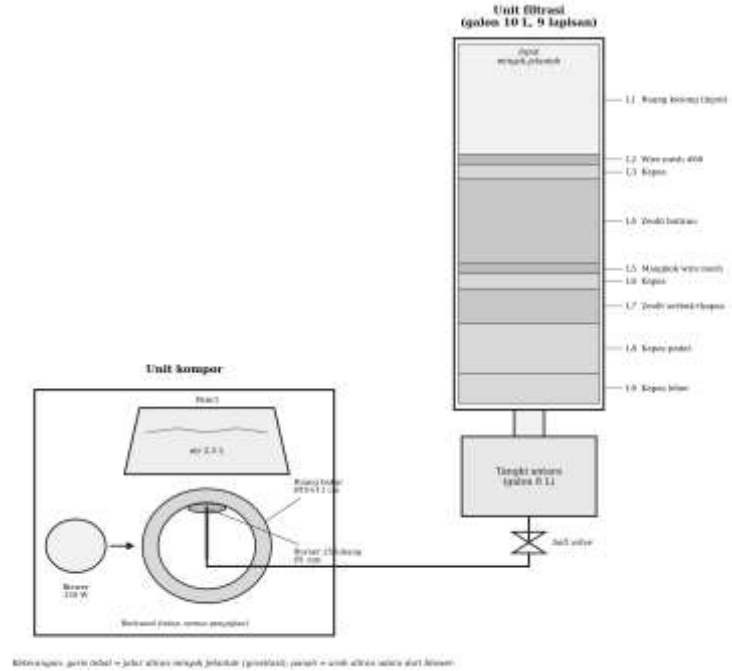
2. Metodologi

2.1 Prototipe dan Sistem Filtrasi

Prototipe kompor terdiri atas dua unit yang terintegrasi secara fungsional, yaitu unit kompor dan unit filtrasi. Unit kompor memiliki rangka besi siku berukuran 25×25×22 cm dengan ruang bakar silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 11 cm. Bahan bakar dialirkan secara gravitasi melalui pipa berkatup (*ball valve*) menuju pilar *burner*, menetes pada permukaan panas, tervaporisasi, dan terbakar melalui 25 lubang berdiameter ±1 mm

pada pelat *burner* (sistem *drip-vaporizer*). Udara pembakaran disuplai oleh *blower* sentrifugal 150 W (3000–3600 rpm) yang dioperasikan konstan tanpa pengaturan *dimmer*. Dinding ruang bakar dilingkupi insulasi *rock-wool* setebal 2,0–2,5 cm; konfigurasi insulasi ini dibuat identik pada seluruh pengujian dan tidak menjadi variabel yang dianalisis pada artikel ini.

Skema unit kompor dan unit filtrasi beserta susunan lapisannya ditunjukkan pada Gambar 1. Unit filtrasi berupa galon bekas 10 L (Ø19,5 cm × tinggi 36 cm) yang disusun sebagai sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit dengan sembilan lapisan berurutan dari *input* ke *output*: (L1) ruang kosong penampung *input* ± 4 L; (L2) *wire mesh* stainless #60 sebagai *pre-filter* partikel besar; (L3) kapas pembalut sebagai filter partikel halus; (L4) zeolit alam butiran ukuran 02 setebal 6 cm sebagai adsorben utama untuk asam lemak bebas dan air; (L5) mangkok *wire mesh* tiga lapis sebagai penahan zeolit butiran; (L6) kapas pembalut sebagai pemisah lapisan; (L7) zeolit alam serbuk mesh 80 dikombinasikan kapas sebagai adsorpsi halus lanjutan; (L8) kapas padat pada bagian pundak galon untuk *polishing* dan pengendalian laju alir; dan (L9) kapas pada leher galon sebagai sumbat akhir anti-rembesan. Sistem ini disebut sebagai sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit karena tersusun atas kombinasi media penyaring mekanis, kapas, zeolit butiran, dan zeolit serbuk, bukan zeolit tunggal. Minyak jelantah mentah diendapkan 1–2 jam sebelum dituang ke unit filtrasi dan dibiarkan menetes secara gravitasi selama 4–7 jam untuk menghasilkan bahan bakar kondisi P; secara visual, minyak hasil filtrasi tampak lebih jernih dan berwarna lebih terang dibandingkan minyak mentah, meskipun perubahan ini hanya diamati secara kualitatif dan tidak diukur secara instrumental.



Gambar 1. Skema unit kompor dan unit filtrasi sembilan lapisan berbasis zeolit

2.2 Desain dan Prosedur Pengujian

Penelitian menggunakan desain dua kondisi, yaitu kondisi K (minyak jelantah tanpa filtrasi) dan kondisi P (minyak jelantah setelah melalui sistem filtrasi sembilan lapisan), masing-masing direplikasi tiga kali (K-1, K-2, K-3, dan P-1, P-2, P-3), sehingga total enam pengujian. Konfigurasi dan variabel pengujian secara ringkas disajikan pada Tabel 1. Setiap pengujian mengikuti prosedur yang diadaptasi dari prinsip *Water Boiling Test*: kompor dinyalakan melalui pemanasan awal (*pre-heating*) 50 mL spiritus selama 3–4 menit

hingga suhu ruang bakar mencapai ±250 °C, mengacu pada kajian pengaruh campuran spiritus terhadap karakteristik pembakaran [16], kemudian *ball valve* dibuka perlahan sehingga minyak menetes ke pilar *burner* dengan laju sekitar satu tetes per detik. Setelah nyala api stabil, 2,5 L air dengan massa 2,5 kg dimasukkan ke dalam panci *stainless steel* dan pengujian berjalan selama 20 menit dengan pencatatan suhu setiap 2 menit (menit ke-0 hingga ke-20, 11 titik data). Prosedur ini tidak menjalankan seluruh tahapan WBT standar (*cold start*, *hot start*, dan *simmer*) sebagaimana diuraikan pada standardisasi metode WBT untuk kompor berbahan bakar cair [17]; hanya tahap *cold start* yang dijalankan dengan durasi tetap 20 menit, sehingga disebut sebagai pengujian dengan pendekatan *Water Boiling Test*, bukan protokol WBT standar penuh. Keenam pengujian dilaksanakan berurutan (K-1 hingga K-3, dilanjutkan P-1 hingga P-3) dengan jeda pendinginan kompor 15–20 menit antarreplikasi untuk menjaga kondisi awal yang konsisten; urutan blok ini merupakan keterbatasan metodologis yang dibahas lebih lanjut pada subbab 4.6.

Tabel 1. Konfigurasi dan variabel pengujian

Parameter	Nilai	Keterangan
Kondisi pengujian	K (tanpa filtrasi); P (filtrasi 9 lapis zeolit)	Variabel bebas
Jumlah replikasi	3 per kondisi (6 total)	K-1, K-2, K-3, P-1, P-2, P-3
Volume air	2,5 L (massa 2,5 kg)	Variabel kontrol
Volume bahan bakar dimuat	700 mL	Variabel kontrol; bukan nilai konsumsi
Volume spiritus *preheating*	50 mL	Variabel kontrol
Durasi pengujian	20 menit	Variabel kontrol
Interval pencatatan	2 menit	11 titik data (menit ke-0 s.d. ke-20)
Instrumen suhu	*Thermo gun infrared*	Rentang -50–550 °C, akurasi ±2 °C
Lokasi pengujian	Area bengkel (*outdoor*)	Variabel kontrol

2.3 Parameter dan Instrumen Pengukuran

Parameter utama yang diukur pada penelitian ini adalah suhu air, yang diukur menggunakan *thermo gun infrared* (rentang -50 hingga 550 °C, akurasi ±2 °C) yang diarahkan ke permukaan air di tengah panci pada setiap interval pencatatan. *Thermo gun* dipilih karena termometer celup tidak tersedia di lokasi pengujian. Sebagai indikator tambahan, suhu dinding luar ruang bakar (bagian yang tidak terinsulasi) diukur pada empat sisi (depan, kanan, kiri, belakang) dengan *thermo gun* dari jarak 10–15 cm dan dirata-ratakan. Instrumen dikalibrasi sebelum pengujian melalui verifikasi pada titik acuan 0 °C (air es) dan 100 °C (air mendidih) dengan toleransi ±1 °C. Volume air dan volume bahan bakar yang dimuat diukur menggunakan gelas takar (100 mL dan 1000 mL), sedangkan waktu dicatat menggunakan *stopwatch* beresolusi 1 detik. Variabel bebas pada penelitian ini adalah kondisi bahan bakar (K atau P); variabel terikat yang dianalisis adalah profil suhu air, energi yang diserap air, waktu pencapaian suhu ≥95 °C, serta parameter turunan konsumsi bahan bakar, sedangkan volume air, volume bahan bakar yang dimuat, volume spiritus, durasi, interval pencatatan, spesifikasi *blower*, dan dimensi prototipe dijaga tetap sebagai variabel kontrol.

Berbeda dengan suhu air, konsumsi bahan bakar tidak diukur secara langsung pada penelitian ini. Gelas takar hanya digunakan untuk menakar volume bahan bakar yang dimuat (700 mL), sedangkan volume yang benar-benar terpakai selama 20 menit pada setiap replikasi tidak tercatat, baik dengan *flowmeter* maupun dengan penimbangan bahan bakar sebelum dan sesudah pengujian. Nilai konsumsi yang dipakai dalam perhitungan

sehingga merupakan estimasi berbasis literatur (dijelaskan dalam subbab 2.4). Konsekuensinya, Q_{in}, η, SFC, dan Q_{loss} mengandung ketidakpastian yang tidak dapat dikuantifikasi secara metrologis seperti halnya akurasi *thermo gun*, karena tidak ada nilai ukur yang dapat dijadikan pembanding. Ketidakpastian ini ditangani dengan tiga cara yaitu (i) memisahkan secara tegas besaran yang diukur, besaran yang dihitung dari data terukur, dan besaran yang bergantung pada estimasi (Tabel 4); (ii) menelaah seberapa besar perubahan estimasi yang dapat membalik kesimpulan melalui analisis sensitivitas dan nilai ambang impas (subbab 2.4 dan Tabel 5); dan (iii) menempatkan kesimpulan utama penelitian pada besaran yang tidak bergantung pada konsumsi bahan bakar, yaitu profil suhu air, waktu pencapaian suhu ≥95 °C, dan Q_{out}.

2.4 Pengolahan Data

Energi yang diserap air dihitung dengan Pers. (1):

$$Q_{out} = m_{air} \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

dengan m_{air} adalah massa air (2,5 kg), c_p adalah kalor jenis air (4,186 kJ/kg·°C), dan ΔT adalah selisih antara suhu air maksimum dan suhu air awal (°C). Energi pembakaran dihitung dengan Pers. (2):

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

dengan m_f adalah massa bahan bakar (kg) dan HV adalah nilai kalor minyak jelantah, 39.540 kJ/kg, mengacu pada [6]. Karena konsumsi bahan bakar pada penelitian ini tidak diukur secara kontinu dengan *flowmeter* maupun metode gravimetri langsung, nilai m_f ditentukan sebagai estimasi berdasarkan analisis profil pembakaran dan kesetaraan dengan literatur kompor minyak jelantah berinsulasi [6], [8], yaitu 13,5 mL/menit (setara 270 mL selama 20 menit, m_f = 240,3 g) untuk kondisi K dan 12,25 mL/menit (setara 245 mL selama 20 menit, m_f = 218,0 g) untuk kondisi P, dengan massa jenis minyak jelantah 0,89 kg/L [5], [6]. Efisiensi termal dihitung dengan Pers. (3) dan *specific fuel consumption* dengan Pers. (4):

$$\eta = (Q_{out} / Q_{in}) \times 100\% \quad (3)$$

$$SFC = m_f / V_{air} \quad (4)$$

dengan V_{air} adalah volume air (L). *Heat loss* dihitung sebagai $Q_{loss} = Q_{in} - Q_{out}$. Karena Q_{in}, η, SFC, dan Q_{loss} seluruhnya diturunkan dari nilai m_f yang sama pada setiap kondisi, keempat besaran ini tidak diperlakukan sebagai empat bukti eksperimental yang independen, melainkan sebagai satu kelompok besaran yang bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar. Mengingat jumlah replikasi yang terbatas (n=3 per kondisi), analisis data menggunakan statistik deskriptif berupa rata-rata dan simpangan baku pada setiap kondisi dan setiap titik waktu, tanpa menerapkan uji statistik inferensial seperti uji-t atau ANOVA.

Ketidakpastian estimasi konsumsi bahan bakar ditelaah melalui analisis sensitivitas sederhana, bukan melalui pengukuran ulang. Nilai m_f kedua kondisi divariasikan pada lima skenario: (i) skenario dasar sebagaimana dijelaskan di atas; (ii) m_f kedua kondisi diubah bersama sebesar ±10%; (iii) m_f kedua kondisi diubah bersama sebesar ±15%, yang dipilih sebagai asumsi kewajaran ketidakpastian estimasi berbasis literatur dan bukan hasil kalibrasi; (iv) konsumsi kondisi P dianggap sama dengan kondisi K; dan (v) konsumsi kondisi P dianggap 5% lebih besar daripada kondisi K. Selain itu dihitung nilai ambang impas, yaitu m_f kondisi P yang menghasilkan η sama dengan kondisi K, yang secara matematis sebesar m_f kondisi K dikalikan rasio Q_{out} kondisi P terhadap kondisi K. Analisis ini hanya menunjukkan seberapa jauh kesimpulan bergantung pada asumsi konsumsi bahan bakar dan tidak menggantikan pengukuran langsung.

Sebagai pembanding, penelitian kompor minyak bekas yang menimbang massa bahan bakar terpakai secara langsung dengan timbangan digital dan *flowmeter*, serta mengulang pengujian sebanyak delapan kali, dilaporkan pada [15]. Perlu dicatat bahwa selisih estimasi konsumsi antara kondisi K dan P ditetapkan berdasarkan profil pemanasan yang lebih baik pada kondisi P sehingga tidak independen dari hipotesis penelitian; η, SFC, dan Q_{loss} karenanya tidak dapat berfungsi sebagai

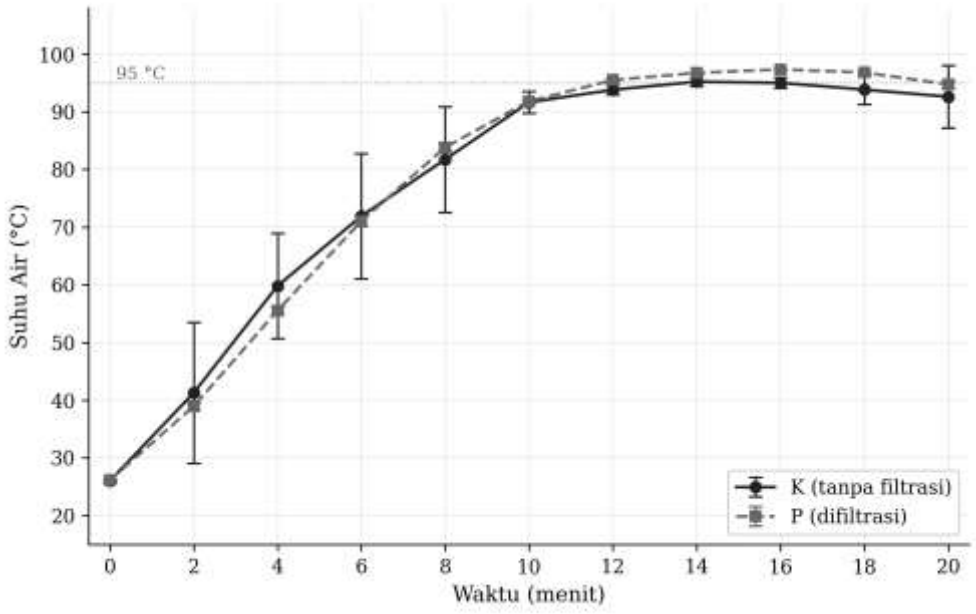
bukti keunggulan filtrasi dan hanya menunjukkan besaran yang akan diperoleh apabila asumsi konsumsi tersebut benar. Laju tetes sekitar satu tetes per detik ditetapkan secara visual tanpa kalibrasi volume per tetes sehingga tidak dapat dipakai untuk memverifikasi estimasi tersebut.

3. Hasil

3.1 Profil Pemanasan Air

Profil suhu air terhadap waktu untuk kondisi K dan P, dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku dari tiga replikasi, ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 2. Kedua kondisi memulai pengujian pada suhu ruang sekitar 26 °C dan mengalami kenaikan suhu yang cepat pada 10 menit pertama, sebelum melandai mendekati 90–97 °C pada menit ke-12 hingga ke-16. Tidak satu pun dari kedua kondisi mencapai titik didih 100 °C dalam durasi pengujian 20 menit; suhu tertinggi yang teramati berada pada kisaran 95–97 °C.

Pada rentang menit ke-2 hingga ke-6, rata-rata suhu K sedikit lebih tinggi atau setara dengan P. Pola ini berasal dari satu replikasi K (K-1) yang memanas jauh lebih cepat pada fase awal (subbab 3.2), bukan dari kecenderungan umum kondisi K. Sejak menit ke-8, suhu rata-rata P berada di atas K hingga akhir pengujian, dengan selisih rata-rata P–K yang membesar dari sekitar 2 °C pada menit ke-8 menjadi hampir 3 °C pada menit ke-18. Pita simpangan baku pada Gambar 2 tampak jauh lebih sempit pada kondisi P di hampir seluruh titik waktu dibandingkan dengan kondisi K.



Gambar 2. Profil suhu air terhadap waktu, kondisi K vs P (rata-rata ± SD, n=3)

Tabel 2. Profil temperatur air rata-rata ± SD (n=3)

Menit	T_{air} K (°C)	T_{air} P (°C)
0	25,97 ± 0,25	26,13 ± 0,15
2	41,27 ± 12,24	38,93 ± 0,67
4	59,80 ± 9,13	55,53 ± 0,70
6	71,90 ± 10,83	71,03 ± 0,86
8	81,73 ± 9,15	83,83 ± 0,60
10	91,63 ± 1,89	91,80 ± 0,30
12	93,80 ± 0,82	95,50 ± 0,30
14	95,20 ± 0,78	96,73 ± 0,21
16	95,00 ± 0,92	97,33 ± 0,15
18	93,83 ± 2,55	96,80 ± 0,30
20	92,60 ± 5,46	94,73 ± 0,60

3.2 Hasil per Replikasi

Pada kondisi K, simpangan baku suhu air antarreplikasi bervariasi tajam sepanjang pengujian, mencapai 12,24 °C pada menit ke-2 dan kembali membesar menjadi 5,46 °C pada menit ke-20, sedangkan pada kondisi P simpangan baku tetap berada di bawah 1 °C pada hampir seluruh titik waktu setelah menit ke-2 (Tabel 2). Data per replikasi disajikan pada Tabel 3. Replikasi K-1 mencatat suhu air 55,4 °C pada menit ke-2, jauh melampaui K-2 (33,9 °C) dan K-3 (34,5 °C) pada titik waktu yang sama. K-1 juga mencapai suhu puncak lebih awal, yaitu 96,1 °C pada menit ke-14, lalu turun hingga 86,3 °C pada menit ke-20, penurunan sekitar 10 °C dalam 6 menit terakhir yang tidak teramati pada K-2 maupun K-3. Pada rentang menit ke-16 hingga ke-20 tersebut, suhu dinding ruang bakar K-1 tetap tinggi, yaitu 178,8–187,2 °C.

Ketiga replikasi P mencapai suhu puncak pada menit yang sama, yaitu menit ke-16 (97,2 °C; 97,5 °C; dan 97,3 °C untuk P-1, P-2, dan P-3), sedangkan ketiga replikasi K mencapai puncaknya pada tiga menit yang berbeda (menit ke-14, ke-16, dan ke-20). ΔT (kenaikan suhu dari awal hingga puncak) pada kondisi P nyaris identik pada ketiga replikasi (71,2 °C), sedangkan pada kondisi K bervariasi antara 69,6–70,1 °C.

Tabel 3. Hasil per replikasi

Replikasi	T puncak (°C)	Menit puncak	Waktu ≥95 °C (menit)	T air menit-2 (°C)	T dinding RB menit-2 (°C)	T air menit-20 (°C)
K-1	96,1	14	14	55,4	133,1	86,3
K-2	95,8	16	16	33,9	75,3	95,7
K-3	95,8	20	16	34,5	76,2	95,8
P-1	97,2	16	12	39,5	135,2	94,1
P-2	97,5	16	12	38,2	132,4	95,3
P-3	97,3	16	12	39,1	133,4	94,8

Keterangan: RB = ruang bakar; T dinding RB adalah rata-rata empat sisi dinding luar ruang bakar yang tidak terinsulasi, diukur dengan thermo gun*.*

Pada menit ke-2, suhu dinding ruang bakar K-1 sudah mencapai 133,1 °C, setara dengan ketiga replikasi P (132,4–135,2 °C), sedangkan K-2 dan K-3 hanya 75,3 dan 76,2 °C. Replikasi K-2 dan K-3 sangat mirip satu sama lain (selisih suhu air maksimum 1,7 °C pada seluruh titik waktu), setara dengan rentang antarreplikasi P (maksimum 1,7 °C).

Dibandingkan dengan K-2 dan K-3, yang kondisi awalnya sebanding, kondisi P mencapai ≥95 °C pada menit ke-12 pada seluruh replikasi, sedangkan K-2 dan K-3 pada menit ke-

16. Selisih rata-rata suhu air terbesar terjadi pada menit ke-6 dan ke-8 (+5,4 dan +7,4 °C); pada menit ke-12 hingga ke-18 selisihnya 1,5–2,2 °C, dan pada menit ke-20 suhu P justru 1,0 °C lebih rendah. Seluruh replikasi P turun 2,2–3,1 °C dari puncaknya antara menit ke-16 dan ke-20, sedangkan K-2 dan K-3 tidak menurun.

3.3 Suhu Puncak dan Waktu Pencapaian ≥95 °C

Suhu air maksimum rata-rata pada kondisi K adalah 95,90±0,17 °C dan pada kondisi P adalah 97,33±0,15 °C, dengan selisih sekitar 1,43 °C. Waktu pencapaian suhu ≥95 °C, yaitu waktu pencatatan pertama ketika suhu air mencapai atau melampaui 95 °C, pada kondisi K rata-rata 15,3±1,2 menit (K-1: 14 menit; K-2: 16 menit; K-3: 16 menit), sedangkan kondisi P memerlukan 12,0 menit pada ketiga replikasi, atau sekitar 3,3 menit lebih cepat. Karena data dicatat setiap 2 menit, angka waktu ini merupakan waktu pencatatan pertama yang memenuhi ambang, bukan waktu kontinu yang presisi hingga hitungan detik.

3.4 Energi Diserap Air dan Suhu Dinding Ruang Bakar

Energi yang diserap air (Q_{out}), yang dihitung dari data suhu terukur melalui Pers. (1), meningkat dari rata-rata 731,85 kJ pada kondisi K menjadi 745,11 kJ pada kondisi P, atau naik sekitar 1,8% (selisih 13,26 kJ). Suhu dinding luar ruang bakar, yang diukur langsung pada empat sisi, pada kondisi P lebih tinggi daripada K pada menit ke-4 hingga ke-16 (selisih rata-rata 7,5–22,5 °C; 179,0 °C terhadap 170,1 °C pada menit ke-14), tetapi lebih rendah pada menit ke-20 (179,7 °C terhadap 184,5 °C).

3.5 Efisiensi Termal, SFC, dan *Heat Loss*

Dengan estimasi konsumsi bahan bakar pada subbab 2.4, efisiensi termal rata-rata kondisi K adalah 7,70±0,03% dan kondisi P adalah 8,64±0,00%, atau peningkatan relatif sebesar 12,20%. *Specific fuel consumption* (SFC) menurun dari 96,12 g/L pada kondisi K menjadi 87,22 g/L pada kondisi P (turun 9,26%), dan laju konsumsi bahan bakar menurun dari 12,02 g/menit menjadi 10,90 g/menit. *Heat loss* (Q_{loss}) menurun dari rata-rata 8.769,61 kJ (92,30% dari Q_{in}) pada kondisi K menjadi 7.876,59 kJ (91,36% dari Q_{in}) pada kondisi P. Ringkasan seluruh parameter beserta statusnya (diukur, dihitung, atau estimasi) disajikan pada Tabel 4.

Hasil analisis sensitivitas terhadap estimasi konsumsi bahan bakar disajikan pada Tabel 5. Perubahan m_f yang sama pada kedua kondisi (±10% dan ±15%) menggeser nilai mutlak η, tetapi peningkatan relatifnya tetap +12,2%. Apabila konsumsi kondisi P dianggap sama dengan kondisi K, peningkatan η turun menjadi +1,8%, dan apabila konsumsi kondisi P dianggap 5% lebih besar, η kondisi P menjadi 3,0% lebih rendah daripada kondisi K. Ambang impas diperoleh pada m_f kondisi P sebesar 1,018 kali m_f kondisi K, yaitu sekitar 244,7 g (≈274,9 mL), hanya sekitar 4,9 mL lebih banyak daripada estimasi konsumsi kondisi K (270 mL).

Tabel 4. Ringkasan hasil kondisi K vs P

Parameter	K	P	Selisih (P−K)	Status
T_{air} awal (°C)	25,97±0,25	26,13±0,15	+0,17	Diukur
T_{air} puncak (°C)	95,90±0,17	97,33±0,15	+1,43	Diukur
Waktu capai ≥95 °C (menit)	15,3±1,2	12,0±0,0	−3,3	Diukur[a]
ΔT (°C)	69,93±0,29	71,20±0,00	+1,27	Dihitung
Q_{out} (kJ)	731,85	745,11	+13,26	Dihitung
Massa bahan bakar, m_f (g)	240,3	218,0	−22,3	Estimasi
Efisiensi, η (%)	7,70±0,03	8,64±0,00	+0,94	Estimasi[b]
SFC (g/L)	96,12	87,22	−8,90	Estimasi[b]
Q_{loss} (kJ)	8.769,61	7.876,59	−893,02	Estimasi[b]

Keterangan: [a] waktu pencatatan pertama saat suhu mencapai ≥95 °C, resolusi pencatatan 2 menit; [b] bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar (bukan hasil pengukuran langsung)

Tabel 5. Analisis sensitivitas efisiensi termal terhadap estimasi konsumsi bahan bakar

Skenario estimasi konsumsi	η K (%)	η P (%)	Selisih relatif P terhadap K
Dasar (m_f K = 240,3 g; m_f P = 218,0 g)	7,70	8,64	+12,2%
m_f kedua kondisi ±10%	7,00–8,56	7,86–9,60	+12,2% (tetap)
m_f kedua kondisi ±15%	6,70–9,06	7,52–10,17	+12,2% (tetap)
m_f P = m_f K (240,3 g)	7,70	7,84	+1,8%
m_f P = 1,05 × m_f K (252,3 g)	7,70	7,47	−3,0%

Keterangan: η dihitung dengan Pers. (3) menggunakan HV = 39.540 kJ/kg dan Q_{out} pada Tabel 4. Rentang pada skenario ±10% dan ±15% menunjukkan nilai untuk m_f yang lebih besar (η lebih rendah) dan lebih kecil (η lebih tinggi).

4. Analisa & Pembahasan

4.1 Keterulangan Profil Pemanasan

Keterulangan profil pemanasan antareplikasi merupakan salah satu temuan penelitian ini, dengan sejumlah catatan. Penurunan suhu air K-1 menjelang akhir pengujian konsisten dengan kondisi pembakaran yang mulai menurun, yang secara teoretis dapat dikaitkan dengan penurunan laju vaporisasi akibat penyumbatan parsial *burner* oleh residu partikel padat, atau ketidakstabilan aliran akibat viskositas minyak yang belum terfiltrasi. Namun, mekanisme pastinya tidak dapat dipastikan dari data suhu saja karena deposit *burner* tidak diukur langsung pada penelitian ini. Suhu dinding ruang bakar K-1 yang tetap tinggi pada menit ke-16 hingga ke-20 juga menunjukkan bahwa penurunan suhu air tersebut tidak serta-merta berarti pembakaran melemah, dan dapat pula dipengaruhi faktor pengukuran, misalnya uap pada permukaan air yang terbaca oleh *thermo gun*.

Konsistensi waktu puncak dan besaran ΔT pada ketiga replikasi P mengindikasikan kemungkinan bahwa filtrasi berkontribusi pada keterulangan dan prediktabilitas proses pemanasan, dan bukan semata-mata pada peningkatan suhu puncak itu sendiri. Temuan ini perlu dibaca sebagai pola pada data termal, bukan sebagai bukti langsung perbaikan mutu kimiawi bahan bakar, karena karakterisasi kimiawi minyak tidak dilakukan secara instrumental pada penelitian ini. Dengan hanya tiga replikasi per kondisi, simpangan baku itu sendiri merupakan estimasi yang kurang stabil, dan variasi besar pada kondisi K sebagian besar bersumber dari satu replikasi (K-1).

Suhu dinding ruang bakar K-1 pada menit ke-2 yang setara dengan replikasi P, sementara K-2 dan K-3 jauh lebih rendah, menunjukkan bahwa penyalaan dan pemanasan awal K-1 berlangsung lebih cepat. Simpangan baku yang besar pada menit ke-2 hingga ke-8 kondisi K karenanya lebih mungkin mencerminkan perbedaan kondisi awal yang tidak dikendalikan (misalnya saat pembukaan *ball valve* dan sisa panas pemanasan awal spiritus) daripada kualitas minyak, meskipun penyebab pastinya tidak dapat ditentukan dari data yang ada. Karena K-2 dan K-3 memiliki keterulangan yang setara dengan kondisi P, keunggulan keterulangan kondisi P terhadap K bertumpu pada satu replikasi (K-1) dan belum dapat disimpulkan secara tegas.

Perbandingan P dengan K-2 dan K-3, yang kondisi awalnya sebanding, lebih informatif. Selisih suhu pada menit ke-6 dan ke-8 berada di atas akurasi *thermo gun* (±2 °C), sedangkan selisih pada menit ke-12 hingga ke-18 setara dengan ketidakpastian instrumen. Penurunan suhu pada akhir pengujian juga terjadi pada seluruh replikasi P, sehingga bukan hanya fenomena K-1. Dengan n=3, perbandingan ini bersifat deskriptif dan tidak didukung uji inferensial. Pola keterulangan ini berlaku untuk prototipe, kondisi uji, serta urutan pengujian pada penelitian ini, dan pembuktian statistik memerlukan replikasi yang lebih banyak dengan urutan pengujian yang diacak.

4.2 Selisih Suhu Puncak dan Energi terhadap Ketidakpastian Instrumen

Selisih suhu puncak sekitar 1,43 °C lebih kecil daripada akurasi *thermo gun infrared* yang

digunakan (±2 °C). Oleh karena itu, besarnya perbedaan suhu puncak antarkondisi tidak dapat dinyatakan melebihi ketidakpastian instrumen pengukuran, dan penelitian ini tidak mengklaim perbedaan tersebut sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik maupun metrologis. Perbedaan yang lebih dapat diandalkan teramati pada waktu pencapaian suhu ≥95 °C: selisih sekitar 3,3 menit melampaui resolusi pencatatan data (2 menit) sehingga lebih dapat diandalkan sebagai indikasi perbedaan nyata dibandingkan selisih suhu puncak.

Q_{out} diturunkan sepenuhnya dari ΔT yang terukur serta konstanta massa dan kalor jenis air yang tetap, sehingga tidak bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar dan lebih dapat diandalkan daripada η, SFC, dan Q_{loss}. Namun, selisih Q_{out} antarkondisi (13,26 kJ) lebih kecil daripada ketidakpastian yang ditimbulkan oleh akurasi *thermo gun*: ±2 °C pada satu pembacaan suhu setara ±20,9 kJ pada Q_{out} (2,5 kg × 4,186 kJ/kg·°C × 2 °C). Galat sistematik dari instrumen yang sama pada kedua kondisi diperkirakan sebagian saling meniadakan pada perbandingan K–P, tetapi hal ini tidak dapat dikuantifikasi. Kenaikan Q_{out} sebesar 1,8% karenanya dibaca sebagai kecenderungan yang searah dengan suhu puncak yang lebih tinggi, bukan sebagai perbedaan yang terbukti.

Suhu dinding luar ruang bakar juga tidak bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar dan searah dengan pemanasan air yang lebih cepat pada kondisi P. Namun, pengukurannya dengan *thermo gun* pada permukaan logam tanpa koreksi emisivitas serta pengaruh perbedaan kondisi awal (subbab 4.1) membuat indikator ini hanya dapat dibaca sebagai indikasi pendukung.

4.3 Ketergantungan η, SFC, dan Q_{loss} pada Estimasi Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar pada penelitian ini tidak diukur secara kontinu menggunakan *flowmeter* maupun metode gravimetri langsung selama pengujian berlangsung. Nilai yang digunakan dalam perhitungan, yaitu sekitar 270 mL selama 20 menit untuk kondisi K dan 245 mL selama 20 menit untuk kondisi P, merupakan estimasi yang diturunkan dari analisis profil pembakaran dan kesetaraan dengan literatur kompor minyak jelantah berinsulasi (subbab 2.4). Karena Q_{in}, η, SFC, dan Q_{loss} seluruhnya diturunkan dari nilai m_f estimasi yang sama untuk setiap kondisi, keempat besaran ini secara matematis saling terkait erat dan tidak merepresentasikan empat bukti eksperimental yang independen. Penurunan Q_{loss} secara absolut, misalnya, sebagian besar merupakan konsekuensi aritmetika dari Q_{in} kondisi P yang lebih rendah akibat estimasi m_f yang lebih kecil, bukan semata-mata indikasi terpisah dari perbaikan pembakaran.

Simpangan baku efisiensi kondisi P yang mendekati nol juga perlu dimaknai secara hati-hati. Nilai ini muncul karena m_f pada kondisi P menggunakan satu nilai estimasi yang sama untuk ketiga replikasi (bukan hasil pengukuran independen per replikasi), dikombinasikan dengan ΔT kondisi P yang memang hampir identik antarreplikasi. Dengan demikian, simpangan baku efisiensi yang kecil ini mencerminkan konsistensi ΔT terukur, bukan presisi pengukuran konsumsi bahan bakar.

Analisis sensitivitas (Tabel 5) menunjukkan bahwa nilai mutlak η pada Tabel 4 sebaiknya dibaca sebagai orde besar dan bukan hasil pengukuran, sedangkan peningkatan relativenya sangat dipengaruhi oleh selisih m_f antarkondisi. Apabila konsumsi kondisi P disamakan dengan kondisi K, peningkatan η hanya setara dengan peningkatan Q_{out}, dan di atas ambang impas η kondisi P justru lebih rendah daripada kondisi K. Dengan demikian, keunggulan η, SFC, dan Q_{loss} kondisi P pada Tabel 4 hanya berlaku apabila konsumsi bahan bakar kondisi P memang lebih rendah sekitar 9,3% (245 mL terhadap 270 mL) seperti yang diasumsikan, dan hal ini harus diverifikasi melalui pengukuran konsumsi bahan bakar secara langsung.

4.4 Interpretasi Mekanisme Filtrasi

Keterulangan profil pemanasan yang lebih baik pada kondisi P secara teoretis dapat dijelaskan melalui mekanisme adsorpsi zeolit yang telah dilaporkan pada literatur. Struktur pori zeolit alam yang berukuran molekuler

(0,3–0,8 nm) memberikan kapasitas adsorpsi terhadap molekul polar berukuran kecil seperti air dan asam lemak bebas melalui fisisorpsi dan pertukaran ion [9], sementara media penyaring mekanis pada lapisan *wire mesh* dan kapas menahan partikel padat sisa penggorengan.

Penelitian terdahulu melaporkan bahwa filtrasi minyak jelantah dengan zeolit alam mampu menurunkan kadar asam lemak bebas hingga 58% dan bilangan peroksida hingga 47,6% [10]. Jika mekanisme serupa berlaku pada penelitian ini, penurunan asam lemak bebas dan partikel pengotor diduga berkaitan dengan atomisasi dan vaporisasi minyak yang lebih konsisten pada sistem *drip-vaporizer*, sehingga menghasilkan profil pemanasan yang lebih seragam antareplikasi sebagaimana diuraikan pada subbab 4.1. Pengamatan kualitatif terhadap minyak hasil filtrasi, yang tampak lebih jernih dan berwarna lebih terang dibandingkan minyak mentah, sejalan dengan arah perubahan yang dilaporkan pada literatur tersebut.

Penting untuk ditegaskan bahwa kadar asam lemak bebas, bilangan peroksida, kadar air, viskositas, dan densitas minyak jelantah pada penelitian ini tidak diuji secara instrumental, sehingga penjelasan mekanisme di atas bersifat interpretasi teoretis berdasarkan literatur dan pengamatan kualitatif, bukan hasil pengukuran langsung penelitian ini. Klaim penurunan parameter kimiawi tersebut memerlukan pengujian laboratorium tersendiri yang berada di luar cakupan penelitian ini.

4.5 Umur Pakai Zeolit

Umur pakai zeolit pada sistem filtrasi sembilan lapisan ini tidak dievaluasi secara eksperimental: penelitian ini tidak mencatat volume minyak yang dapat difiltrasi sebelum kapasitas adsorpsi zeolit jenuh, maupun perubahan efektivitas filtrasi pada pemakaian berulang. Bahan bakar kondisi P berasal dari satu siklus filtrasi: 4 L minyak mentah dialirkan secara gravitasi selama sekitar 6 jam dan menghasilkan sekitar 3,7 L minyak terfiltrasi (rendemen ±92%), sedangkan sekitar 0,3 L (±7,5%) tertahan pada media filter. Volume 4 L per siklus merupakan batas operasi rancangan, laju alir awal diverifikasi dengan air bersih pada kisaran 8–20 mL/menit, dan zeolit dicuci serta dijemur sebelum dirangkai. Karena hanya satu siklus yang dijalankan, angka umur pakai (dalam liter minyak atau jumlah siklus) tidak dapat dilaporkan, dan kinerja yang dilaporkan hanya mewakili satu siklus filtrasi. Secara prinsip, umur pakai unggun adsorben ditentukan oleh kapasitas adsorpsinya. Seiring bertambahnya volume minyak yang dialirkan, situs adsorpsi zeolit terisi oleh asam lemak bebas, air, dan produk oksidasi, dan pada suatu titik pengotor mulai lolos ke minyak keluaran (titik tembus atau *breakthrough*). Pada lapisan mekanis (*wire mesh* dan kapas), akumulasi partikel padat juga dapat memperlambat laju alir dan menyumbat unggun. Karena minyak jelantah dari sumber yang berbeda memiliki tingkat degradasi yang berbeda dan umur pakai pada praktiknya akan bervariasi.

Literatur menunjukkan bahwa kinerja zeolit dipengaruhi oleh aktivasi. Zeolit alam Bayah misalnya, diaktivasi secara kimia dengan NaOH, kemudian dikeringkan (110 °C, 1 jam) dan dikalsinasi (400 °C, 2 jam) sebelum digunakan [13], dan studi sistem zeolit bertingkat terbaru menyarankan kajian regenerasi dan penggunaan ulang zeolit sebagai penelitian lanjutan [14]. Dengan demikian, umur pakai dan regenerasi zeolit (misalnya aktivasi termal ulang) masih merupakan celah penelitian. Untuk keperluan penerapan, penelitian lanjutan perlu menentukan umur pakai melalui kurva tembus, yaitu bilangan asam atau bilangan peroksida minyak keluaran terhadap volume kumulatif minyak yang difiltrasi, serta memantau indikator praktis seperti kenaikan waktu tetes, warna minyak keluaran yang kembali gelap, dan peningkatan variasi profil pemanasan antareplikasi. Biaya zeolit per liter minyak terfiltrasi juga perlu dihitung agar kelayakan ekonomis sistem ini dapat dibandingkan dengan harga LPG bersubsidi.

4.6 Perbandingan dengan Literatur dan Keterbatasan

Nilai efisiensi termal yang diperoleh pada penelitian ini (7,70–8,64%) berada di bawah kisaran yang dilaporkan pada kompor minyak jelantah satu tungku tanpa insulasi, yaitu 10,03–10,41% [6], dan jauh di bawah kompor

briket berinsulasi *mineral wool* yang mencapai 28,01% [18]. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan konfigurasi pengujian. Volume air uji pada penelitian ini (2,5 L) lebih besar dibandingkan volume umum pada pengujian WBT skala kecil, durasi pengujian yang dibatasi 20 menit menyebabkan air belum mencapai titik didih penuh, serta diameter ruang bakar (10 cm) yang relatif kecil terhadap diameter panci sehingga berpotensi menimbulkan kehilangan panas konvektif di sekitar dasar panci. Perbandingan internal antara kondisi K dan P pada penelitian ini tetap dapat diandalkan karena seluruh variabel tersebut dijaga identik pada kedua kondisi.

Beberapa keterbatasan metodologis perlu dicermati dalam menafsirkan hasil penelitian ini. Pertama, akurasi *thermo gun infrared* (±2 °C) membatasi presisi interpretasi selisih suhu yang berskala kecil, sebagaimana telah didiskusikan pada subbab 4.2. Termometer celup tidak tersedia di lokasi pengujian sehingga suhu air diukur pada permukaan dengan *thermo gun*; penggunaan termometer celup atau termokopel direkomendasikan pada penelitian lanjutan. Kedua, konsumsi bahan bakar merupakan estimasi, bukan hasil pengukuran langsung, sehingga seluruh besaran turunannya (Q_{in}, η, SFC, Q_{loss}) mengandung ketidakpastian tambahan yang hanya dapat ditelaah melalui analisis sensitivitas (Tabel 5) dan tidak dapat menggantikan pengukuran langsung. Ketiga, keenam pengujian dilaksanakan dalam urutan blok tetap (seluruh replikasi K terlebih dahulu, diikuti seluruh replikasi P), bukan diacak atau diselang-seling, sehingga kemungkinan pengaruh faktor waktu seperti perubahan kondisi lingkungan atau keausan komponen kompor antar-blok pengujian tidak dapat sepenuhnya disingkirkan. Kondisi awal penyalaan antar-replikasi juga tidak dikendalikan secara terukur, sebagaimana tampak dari perbedaan suhu dinding ruang bakar pada menit ke-2 (Tabel 3). Keempat, jumlah replikasi yang terbatas (n=3 per kondisi) pada satu prototipe membatasi analisis pada statistik deskriptif, membuat simpangan baku kurang stabil, dan tidak mendukung generalisasi hasil ke prototipe, kondisi operasi, maupun sumber minyak jelantah yang berbeda. Penelitian lanjutan sebaiknya menggunakan lima replikasi atau lebih per kondisi dengan urutan pengujian yang diacak sehingga uji inferensial (misalnya uji-t Welch atau Mann-Whitney) dapat diterapkan. Kelima, karakterisasi kimiawi bahan bakar tidak dilakukan secara instrumental, sehingga interpretasi mekanisme filtrasi pada subbab 4.4 bersifat teoretis. Keenam, umur pakai dan kemampuan regenerasi zeolit tidak dievaluasi sebagaimana dibahas pada subbab 4.5. Pengukuran konsumsi bahan bakar secara langsung menggunakan *flowmeter* atau metode gravimetri, karakterisasi kimiawi minyak secara laboratoris, serta pengujian umur pakai dan regenerasi zeolit direkomendasikan pada penelitian lanjutan untuk memperkuat temuan ini.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit terhadap karakteristik pemanasan dan kinerja termal kompor minyak jelantah melalui pengujian dengan pendekatan *Water Boiling Test* pada kondisi tanpa filtrasi (K) dan terfiltrasi (P), masing-masing tiga replikasi. Berdasarkan data suhu air yang terukur langsung, kondisi P menunjukkan keterulangan profil pemanasan yang lebih baik dibandingkan kondisi K (sebagian variasi kondisi K bersumber dari kondisi awal pada replikasi K-1): ketiga replikasi P mencapai suhu ≥95 °C secara konsisten pada menit ke-12 dan mencapai suhu puncak pada menit yang sama (menit ke-16), sedangkan replikasi kondisi K menunjukkan variasi yang lebih besar, termasuk satu replikasi yang mengalami penurunan suhu menjelang akhir pengujian. Suhu puncak rata-rata (95,90±0,17 °C untuk K dan 97,33±0,15 °C untuk P) dan energi yang diserap air (Q_{out}, 731,85 kJ untuk K dan 745,11 kJ untuk P) turut meningkat pada kondisi P, dengan Q_{out} sebagai besaran yang dihitung langsung dari data suhu terukur tanpa bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar, meskipun selisih suhu puncak dan Q_{out} antar kondisi berada dalam ketidakpastian instrumen ukur (±2 °C) sehingga dibaca sebagai kecenderungan.

Efisiensi termal, *specific fuel consumption*, dan *heat loss* seluruhnya menunjukkan kecenderungan membaik pada kondisi P (efisiensi meningkat dari 7,70% menjadi 8,64%, SFC menurun dari 96,12 menjadi 87,22 g/L), tetapi ketiga besaran ini bergantung pada estimasi konsumsi bahan bakar yang tidak diukur langsung, sehingga perlu dibaca sebagai satu kelompok besaran yang saling terkait, bukan sebagai bukti independen. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa keunggulan tersebut hilang apabila konsumsi bahan bakar kondisi P ternyata lebih dari sekitar 1,8% di atas kondisi K, sehingga η, SFC, dan Q_{loss} belum dapat dinyatakan sebagai perbaikan yang terbukti. Penelitian ini tidak menghasilkan data pengukuran instrumental terhadap kadar asam lemak bebas, kadar air, bilangan peroksida, viskositas, atau densitas minyak jelantah, sehingga tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan perubahan komposisi kimiawi bahan bakar akibat filtrasi; perbaikan mutu bahan bakar yang diduga terjadi hanya didukung oleh pengamatan kualitatif dan interpretasi teoretis berdasarkan literatur.

Secara keseluruhan, kontribusi yang paling dapat diandalkan dari sistem filtrasi berlapis berbasis zeolit pada penelitian ini adalah pencapaian suhu ≥95 °C yang lebih cepat dan profil pemanasan air yang lebih seragam antarreplikasi pada prototipe yang sama, bukan peningkatan efisiensi termal. Pengaruh filtrasi terhadap keterulangan belum dapat dipisahkan secara tegas dari perbedaan kondisi awal pada K-1. Temuan ini terbatas pada prototipe, kondisi pengujian, dan tiga replikasi per kondisi sehingga belum dapat digeneralisasi. Pengukuran konsumsi bahan bakar secara langsung, karakterisasi kimiawi minyak secara instrumental, serta pengujian umur pakai dan regenerasi zeolit diperlukan pada penelitian lanjutan untuk memperkuat dan memvalidasi temuan ini.

Daftar Pustaka

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Laporan Subsidi Energi Tahun 2024*. Jakarta: ESDM, 2024.

[2] D. Charisma, R. Pratama, and A. Hidayat, "Karakterisasi limbah minyak goreng bekas sebagai bahan bakar alternatif," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 8, no. 2, pp. 45–53, 2021.

[3] R. Nusantara, F. Aditya, and 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.

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

[5] D. Charisma, F. Putri, and T. Setiawan, "Pengaruh viskositas dan FFA terhadap karakteristik pembakaran minyak jelantah," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 9, no. 1, pp. 22–30, 2022.

[6] R. Andika, B. Setiawan, and 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.

[7] M. Iswanda, "Perancangan burner kompor berbahan bakar minyak jelantah dengan variasi jumlah lubang," Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, 2021.

[8] R. S. Nugroho, "Rancang bangun kompor berbahan bakar minyak jelantah dengan sistem drip-vaporizer," *Jurnal Manufaktur*, vol. 15, no. 2, pp. 134–143, 2025.

[9] T. Jalil, H. Susanto, and P. Sari, "Karakteristik dan aplikasi zeolit alam sebagai adsorben industri," *Surya Teknika*, vol. 11, no. 3, pp. 56–65, 2024.

[10] R. Erlita, S. Wijaya, and N. Hasan, "Efektivitas filtrasi minyak jelantah dengan adsorben zeolit alam," *Jurnal Kimia Terapan*, vol. 14, no. 4, pp. 89–98, 2022.

[11] A. Wahab, "Inovasi penjernihan minyak goreng bekas dengan alat sederhana," *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 5, no. 2, pp. 67–74, 2022.

[12] C. Indarto and M. Fakhry, "Efektifitas jenis adsorben dalam pemurnian cooking oil dari jagung varietas lokal Madura," *Agrointek*, vol. 16, no. 4, 2022, doi: 10.21107/agrointek.v16i4.16641.

[13] H. Heriyanto, E. Suhendi, N. F. Asyuni, and I. K. Shahila, "Effect of Bayah natural zeolite for purification of waste cooking oil as feedstock of alkyd resin," *Teknika:*

Jurnal Sains dan Teknologi, vol. 18, no. 1, pp. 49–55, 2022, doi: 10.36055/tjst.v18i1.15542.

[14] S. Dasgupta, M. Das, M. A. Klunk, S. J. S. Xavier, A. Srivastava, G. Lorenzini, and N. R. Caetano, "Hierarchical multizeolitic purification system for upgrading waste frying oil into high-quality biodiesel feedstock," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 12, no. 10, pp. 3335–3347, 2025, doi: 10.18280/mmep.121001.

[15] S. Sudarno, F. Fadelan, W. A. Setyatinika, and Y. Winardi, "The effect of fuel preheating on the performance of used oil fuel stoves," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 22, no. 3, pp. 564–572, 2024, doi: 10.5937/jaes0-48185.

[16] T. Jalil, A. Wijaya, and S. Hidayat, "Pengaruh campuran spiritus terhadap karakteristik pembakaran," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 4, pp. 200–208, 2024.

[17] N. Fatin, R. Sari, and B. Pranata, "Standardisasi metode water boiling test untuk kompor berbahan bakar cair," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 7, no. 2, pp. 101–110, 2024.

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