SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: PENGEMBANGAN HEAT EXCHANGER UNTUK PENGERING (DRYER) DENGAN MENGGUNAKAN PEMANFAATAN LIMBAH PANAS MESIN DIESEL YANMAR TS190H BERBASIS ECO-SMART

Muhammad Almustaqim[1], Rifdarmon[2]*, Wakhinudin[3], Nuzul Hidayat[4]

[1,2,3,4]*Universitas Negeri Padang*
E-mail : rifdarmon@ft.unp.ac.id

ABSTRACT

This study aims to synthesize the engineering parameters, thermal performance, and control architectures of heat exchangers (HE) for agricultural drying systems utilizing waste heat from stationary diesel engines, specifically the Yanmar TS190H class, within an eco-smart paradigm. Using the Systematic Literature Review (SLR) method strictly governed by the PRISMA protocol, this study screened peer-reviewed empirical articles published within the last five years (2021–2026) indexed in Scopus and SINTA databases. The selected literature was subjected to rigorous quality assessment and hybrid thematic analysis. Key findings indicate that finned-tube, heat pipe, and helically coiled heat exchangers represent optimal configurations, achieving heat recovery effectiveness between 60% and 85% while minimizing excessive backpressure and particulate fouling risks. Furthermore, the integration of eco-smart IoT architectures (sensing layers, adaptive PID/Fuzzy logic dampers, and variable speed blowers) effectively stabilizes drying chamber temperatures, suppresses exergy destruction, and guarantees post-harvest product quality. This review formulates an integrated eco-smart thermal recovery framework that bridges thermo-fluid mechanics with smart automation for sustainable agro-industrial applications.

Keywords : *Waste Heat Recovery, Diesel Engine TS190H, Heat Exchanger, Agricultural Dryer, Eco-Smart System, PRISMA.*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis parameter keteknikan, performa termal, dan arsitektur kendali heat exchanger (HE) pada sistem pengering (dryer) pertanian yang memanfaatkan limbah panas gas buang mesin diesel stasioner (khususnya kelas Yanmar TS190H) berbasis eco-smart. Menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) yang disusun ketat berdasarkan protokol PRISMA, penelitian ini menyaring artikel-artikel empiris peer-reviewed lima tahun terakhir (2021–2026) dari basis data Scopus dan SINTA. Artikel terpilih diuji kualitasnya dan dianalisis secara tematik hibrida. Temuan utama menunjukkan bahwa konfigurasi finned-tube, pipa kalor (heat pipe), dan helically coiled merupakan geometri penukar kalor paling optimal dengan efektivitas pemulihan panas mencapai 60%–85% serta mampu memitigasi risiko backpressure dan penumpukan jelaga (fouling). Lebih lanjut, integrasi arsitektur eco-smart berbasis IoT (lapisan sensorik, aktuator damper bypass adaptif PID/Fuzzy, dan kontrol kecepatan aliran udara) terbukti menjaga kestabilan temperatur ruang pengering, menekan destruksi eksergi, dan mempertahankan mutu hasil panen. Kebaruan studi ini terletak pada formulasi kerangka integratif pemulihan termal cerdas yang memadukan dinamika termo-fluida dengan otomasi lingkungan.

Kata Kunci : *Limbah Panas, Mesin Diesel TS190H, Heat Exchanger, Pengering Pertanian, Sistem Eco-Smart, PRISMA.*

PENDAHULUAN

Akselerasi efisiensi energi dan dekarbonisasi di sektor pascapanen pertanian menuntut transformasi radikal pada teknologi pengeringan konvensional yang selama ini membebani biaya operasional akibat tingginya konsumsi bahan bakar fosil dan biomassa mentah (Kumar dkk., 2021; Pangavhane dkk., 2022). Mesin diesel satu silinder stasioner tipe horizontal, seperti Yanmar TS190H (kapasitas ~19 HP), menjadi unit penggerak mekanis utama pada sentra penggilingan padi, pompa irigasi, dan perontok biji-bijian di negara agraris (Bhoi & Patil, 2021; Setiyo dkk., 2021). Namun, efisiensi termal motor bakar stasioner ini hanya berkisar 30%–35%, di mana lebih dari sepertiga energi bahan bakar terbuang secara percuma melalui aliran gas buang (exhaust gas) bertemperatur 250°C–380°C ke lingkungan terbuka (Oladokun & Odesola, 2021; Ahmed dkk., 2022).

Pemanfaatan kembali energi terbuang (waste heat recovery) menggunakan penukar kalor (heat exchanger) untuk menyuplai udara pemanas ruang pengering terbukti secara empiris mampu menekan biaya operasional dan jejak emisi karbon secara signifikan (Rahman & Hasan, 2022; Thirunavukkarasu & Senthil, 2023). Kendati demikian, integrasi heat exchanger langsung pada saluran gas buang mesin diesel menghadapi hambatan teknis serius, terutama lonjakan tekanan balik (backpressure) yang dapat mendegradasi efisiensi volumetrik mesin serta laju akumulasi jelaga partikulat (soot fouling) yang menurunkan resistansi termal pipa penukar panas secara drastis (Ndiritu dkk., 2022; Zhang dkk., 2022; Guo dkk., 2022). Di samping itu, beban putaran mesin yang fluktuatif menyebabkan ketidakstabilan pasokan kalor yang berisiko merusak kualitas bahan pangan jika tidak dikendalikan secara adaptif (Wang dkk., 2023; Sari & Wardana, 2022).

Kesenjangan riset saat ini memperlihatkan bahwa studi rekayasa termal mesin diesel dan sistem instrumentasi pengeringan cerdas masih berjalan secara parsial dan terisolasi. Oleh karena itu, Systematic Literature Review (SLR) ini bertujuan mengonsolidasikan bukti empiris lima tahun terakhir (2021–2026) mengenai desain optimal heat exchanger, fenomena perpindahan panas, mitigasi fouling/backpressure, evaluasi termodinamika/eksergi, serta arsitektur kontrol eco-smart berbasis IoT guna menghadirkan cetak biru rancang bangun sistem pengeringan terpadu (Aziz & Darmawan, 2021; Jafari & Mehdizadeh, 2021; Al-Nimr & Al-Ammari, 2023).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) yang disusun secara rigid mengacu pada pedoman internasional PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk memastikan transparansi dan replikabilitas sintesis literatur (Gowrishankar dkk., 2022; Kaviarasu & Arunkumar, 2023). Formulasi pertanyaan penelitian diformulasikan melalui kerangka kerja PICOS (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Study Design): (1) Bagaimana karakteristik geometri heat exchanger terbaik untuk memulihkan panas gas buang diesel stasioner tanpa menimbulkan backpressure kritis? (2) Bagaimana neraca energi dan kinetika pengeringan bahan pangan menggunakan limbah panas tersebut? dan (3) Bagaimana arsitektur kontrol eco-smart berbasis IoT memodulasi kestabilan temperatur ruang pengering? (Li dkk., 2023; Mishra & Srivastava, 2023).

Pencarian literatur primer dijalankan secara komprehensif pada basis data Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan SINTA menggunakan kombinasi operator Boolean: ("waste heat recovery" OR "exhaust gas") AND ("diesel engine" OR "stationary engine") AND ("heat

exchanger" OR "dryer") AND ("eco-smart" OR "IoT control"). Kriteria inklusi dibatasi secara ketat pada artikel jurnal empiris peer-reviewed teks lengkap yang diterbitkan dalam rentang waktu lima tahun terakhir (2021–2026) (Putra dkk., 2021; Sahu & Choudhary, 2021). Seluruh artikel yang lolos melalui tahapan identifikasi, screening, dan eligibility kemudian dinilai kualitas metodologinya menggunakan instrumen CASP (Critical Appraisal Skills Programme) sebelum diekstraksi ke dalam matriks sintesis tematik (Khan & Raja, 2021; Rout dkk., 2023; Prasad & Subrahmanyam, 2022).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geometri dan Termo-Fluida Heat Exchanger

Pemilihan tipe dan geometri penukar kalor merupakan parameter determinan yang menentukan efisiensi penyerapan limbah panas gas buang mesin diesel stasioner seperti kelas Yanmar TS190H (Oladokun & Odesola, 2021; Setiyo dkk., 2021). Aliran gas buang diesel membawa karakteristik kecepatan fluktuatif dan partikel jelaga tersuspensi yang menuntut desain saluran dengan koefisien perpindahan panas konveksi tinggi namun memiliki resistansi aliran yang minimal (Ndiritu dkk., 2022; Ahmed dkk., 2022). Pemetaan terhadap artikel empiris terpilih mengenai perancangan dan performa heat exchanger disajikan secara terstruktur pada Tabel 1.

Table 1. Matriks Sintesis Literatur Desain Heat Exchanger untuk Gas Buang Mesin Diesel

Penulis	Judul & Tahun	Metode	Temuan Utama	Jurnal
Mishra & Srivastava	Design optimization of finned-tube heat exchangers for waste heat recovery in low-power diesel engines (2023)	Eksperimental & Optimasi Numerik	Penambahan sirip (fins) meningkatkan luas permukaan efektif hingga 45%, menghasilkan laju transfer kalor optimum untuk mesin diesel daya rendah.	Thermal Science and Engineering Progress
Rout dkk.	Waste heat recovery from diesel generator exhaust using heat pipe heat exchanger for drying applications (2023)	Eksperimental	Pipa kalor (heat pipe) mentransfer panas secara isotermal dengan efektivitas tinggi dan tahan terhadap fluktuasi termal gas buang generator/diesel.	Case Studies in Thermal Engineering

Ndiritu dkk.	Thermo-fluid dynamics and pressure drop characterization of compact exhaust-gas heat exchangers for stationary diesel engines (2022)	Simulasi CFD & Pengujian Lapangan	Karakterisasi penurunan tekanan (pressure drop) menunjukkan batas kritis backpressure agar efisiensi volumetrik mesin stasioner tetap stabil.	Applied Thermal Engineering
Prasad & Subrahmanyam	Experimental analysis of a shell and helically coiled tube heat exchanger for diesel engine exhaust waste heat recovery (2022)	Eksperimental	Geometri helically coiled tube memicu aliran sekunder (Dean vortices) yang meningkatkan koefisien konveksi termal dan menghambat penumpukan jelaga.	Heat Transfer Engineering
Zhang dkk.	Investigation of compact heat exchanger fouling and backpressure trade-offs in diesel waste heat recovery (2022)	Kuantitatif & Model Analitik	Terdapat titik temu (trade-off) optimal antara kerapatan sirip HE, laju penumpukan partikulat jelaga (fouling), dan kenaikan backpressure.	Energy Conversion and Management
Guo dkk.	Performance characteristics of finned-tube heat exchanger under diesel exhaust gas particulate fouling conditions (2022)	Eksperimental	Deposisi jelaga partikulat menyebabkan degradasi efektivitas termal hingga 18% setelah 40 jam operasi kontinyu tanpa sistem pembersih.	Powder Technology

Khan & Raja	Performance investigation of compact heat exchanger with porous inserts for low-grade waste heat recovery (2021)	Eksperimental Numerik	Penggunaan sisipan berpori (*porous inserts*) memperluas turbulensi lokal dan meningkatkan bilangan Nusselt pada bilangan Reynolds rendah.	International Journal of Thermal Sciences
Putra dkk.	Utilization of loop heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in food drying applications (2021)	Eksperimental	*Loop heat pipe* (LHP) mampu memisahkan jalur fluida secara hermetik sehingga mengeliminasi total risiko kontaminasi bau/jelaga pada produk pangan.	International Journal of Technology
Sahu & Choudhary	Advanced thermohydraulic performance analysis of a corrugated plate heat exchanger for waste heat harvesting (2021)	Eksperimental Komparatif	Pelat bergelombang (*corrugated plate*) menghasilkan pencampuran termal intensif dengan penurunan volume material penukar panas.	Case Studies in Thermal Engineering
Li dkk.	Multi-objective optimization of an exhaust gas heat exchanger for small diesel power units (2023)	Algoritma Genetika & CFD	Optimasi multi-objektif menghasilkan rasio pemulihan energi maksimum dengan penalti penurunan daya poros mesin di bawah 2.5%.	Applied Thermal Engineering

Secara teoretis, desain penukar kalor untuk mesin diesel TS190H harus mengadopsi mekanisme perpindahan panas tak langsung (indirect heating) guna memisahkan gas buang beracun dari udara pengering komoditas pangan (Putra dkk., 2021; Bhoi & Patil, 2021). Tipe finned-tube dan heat pipe terbukti paling efektif karena menyediakan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi serta stabilitas termal yang andal pada laju massa gas buang yang rendah (Mishra & Srivastava, 2023; Rout dkk., 2023). Namun, perancangannya wajib memperhitungkan ketebalan lapisan batas termal dan jarak antar-sirip (fin pitch) agar hambatan hidrolik tidak memicu kenaikan backpressure yang melebihi ambang batas operasional mesin (Ndiritu dkk., 2022; Zhang dkk., 2022; Guo dkk., 2022).

1. Kinetika Pengeringan, Analisis Energi, dan Eksergi (3E)

Evaluasi kinerja sistem pengeringan yang terintegrasi dengan pemulihan limbah panas mesin diesel memerlukan analisis komprehensif yang mencakup aspek energi, eksergi, dan ekonomi lingkungan (3E) (Thirunavukkarasu & Senthil, 2023; Wang dkk., 2023). Pemanfaatan udara panas hasil pemulihan kalor terbukti mempercepat laju penguapan air bebas (free moisture) pada komoditas biji-bijian tanpa merusak struktur nutrisi bahan (Rahman & Hasan, 2022; Sari & Wardana, 2022). Sintesis literatur empiris mengenai analisis termodinamika dan kinetika pengeringan dirangkum dalam Tabel 2.

Table 2. Matriks Sintesis Literatur Analisis Termodinamika dan Kinetika Pengeringan

Penulis	Judul dan Tahun	Metode	Temuan Utama (Finding)	Jurnal
Thirunavukkarasu & Senthil	Exergy, economic and environmental (3E) analysis of waste heat assisted drying systems (2023)	Analisis Termodinamika 3E	Integrasi limbah panas mereduksi konsumsi energi spesifik hingga 40% dan mempercepat periode pengembalian modal (payback period).	Environmental Science and Pollution Research
Wang dkk.	Energy, exergy, and economic evaluation of an indirect waste heat recovery dryer for agricultural processing (2023)	Pemodelan Eksergi Numerik	Exergy destruction tertinggi terjadi pada antarmuka inlet HE akibat perbedaan temperatur tajam; dapat ditekan dengan kontrol laju alir udara.	Thermal Science and Engineering Progress
Rahman & Hasan	Design and thermal optimization of	Kuantitatif Eksperimental	Pengeringan biji-bijian berlangsung	Journal of Thermal

	an eco-friendly grain drying system powered by diesel engine waste heat (2022)		seragam pada laju konstan, menghasilkan kadar air akhir 13%–14% dengan tingkat keretakan butir minimum.	Analysis and Calorimetry
Pangavhane dkk.	Design and performance testing of natural convection and waste heat recuperation drying units (2022)	Eksperimental Lapangan	Sistem rekuperasi panas buang meningkatkan efisiensi termal pengeringan dari 21% menjadi 48% dibandingkan pengeringan konvensional.	International Journal of Green Energy
Bhoi & Patil	Performance evaluation of waste heat recovery system integrated with single-cylinder agricultural diesel engine (2021)	Eksperimental	Mesin diesel satu silinder mampu menyuplai energi termal kontinu 2.8–4.2 kW, cukup untuk mengeringkan 50–100 kg komoditas pertanian per siklus.	Journal of Cleaner Production
Sari & Wardana	Thermal enhancement and energy efficiency in agricultural dryers utilizing recovered engine heat (2022)	Eksperimental Termal	Peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi paksa di dalam bak pengering memperpendek durasi pengeringan gabah hingga 35%.	Journal of Mechanical Science and Technology
Oladokun & Odesola	Thermal performance and sizing of a	Pemodelan Matematika & Uji Alat	Penentuan dimensi penukar kalor yang	Energy Reports

	recuperative heat exchanger for single-cylinder stationary diesel engine exhaust (2021)		proporsional dengan kapasitas silinder mesin menjaga kestabilan temperatur outlet udara di atas 50°C.	
Kumar dkk.	Progress in solar-diesel hybrid drying technologies for agricultural produce: A comprehensive review (2021)	Tinjauan Komparatif	Hibridisasi limbah panas mesin diesel menjamin kontinuitas operasional pengeringan pada malam hari atau kondisi cuaca mendung.	Renewable and Sustainable Energy Reviews

Hasil sintesis termodinamika menunjukkan bahwa temperatur gas buang Yanmar TS190H sangat ideal untuk memanaskan udara ambien menuju rentang temperatur kerja pengeringan pangan (45°C–60°C) (Oladokun & Odesola, 2021; Bhoi & Patil, 2021; Rahman & Hasan, 2022). Analisis eksergi mengungkap bahwa fenomena destruksi eksergi terbesar terkonsentrasi pada penukar kalor akibat tingginya beda temperatur rata-rata logaritmik (LMTD) antara gas buang dan udara masuk (Wang dkk., 2023). Oleh karena itu, modulasi rasio massa udara menggunakan sirkulasi udara balik (air recirculation) dan kendali laju alir blower menjadi strategi kunci untuk meminimalkan irreversibility termal serta memaksimalkan efisiensi eksergi sistem (Thirunavukkarasu & Senthil, 2023; Sari & Wardana, 2022).

2. Arsitektur Sistem Kendali Eco-Smart Berbasis IoT

Integrasi teknologi otomasi cerdas dan *Internet of Things* (IoT) ke dalam sistem pemulihan panas limbah diesel membentuk paradigma *eco-smart* yang mengoptimalkan konsumsi energi sekaligus melindungi integritas mesin dan kualitas komoditas (Gowrishankar dkk., 2022; Jafari & Mehdizadeh, 2021). Fluktuasi beban mekanis pada mesin diesel stasioner menuntut aktuasi dinamis pada saluran gas buang dan distribusi udara pengering (Kaviarasu & Arunkumar, 2023; Al-Nimr & Al-Ammari, 2023). Matriks sintesis literatur implementasi kontrol *eco-smart* disajikan pada Tabel 3.

Table 3. Matriks Sintesis Literatur Sistem Kontrol Eco-Smart dan Otomasi IoT

Penulis	Judul dan Tahun	Metode	Temuan Utama (Finding)	Jurnal
Gowrishankar dkk.	Eco-smart IoT architecture for monitoring thermal energy in industrial drying processes (2022)	Rancang Bangun IoT & Sensor	Arsitektur IoT memfasilitasi pemantauan gradien temperatur multi-titik dan estimasi efisiensi termal	Measurement

			secara waktu nyata (real-time).	
Jafari & Mehdizadeh	Smart temperature and airflow control in agricultural dryers using IoT-based microcontrollers (2021)	Eksperimen Kontrol Otomasi	Algoritma PID adaptif pada mikrokontroler berhasil menjaga deviasi temperatur ruang pengering dalam batas ketat ±1.0°C.	Computers and Electronics in Agriculture
Kaviarasu & Arunkumar	IoT-enabled smart monitoring and temperature control system for agro-industrial convective dryers (2023)	Eksperimental IoT	Otomasi penghentian pengeringan berbasis pembacaan sensor RH mencegah fenomena pemanasan berlebih (over-drying) dan pemborosan energi.	Smart Agricultural Technology
Al-Nimr & Al-Ammari	Smart control of heat exchanger networks powered by low-grade thermal waste for sustainable post-harvest drying (2023)	Simulasi Kendali Digital	Sistem katup bypass otomatis mengalirkan kelebihan energi termal saat beban pengeringan menurun, mencegah degradasi kualitas termal.	Sustainable Energy Technologies and Assessments
Aziz & Darmawan	Smart integration of agricultural waste heat recovery systems for energy-efficient grain drying (2021)	Integrasi Tekno-Ekonomi	Integrasi sensor dan aktuator cerdas memperpanjang umur pakai penukar kalor dan mereduksi intervensi manual operator hingga 70%.	Energy Reports
Ahmed dkk.	Evaluation of an innovative concentric heat exchanger for diesel engine exhaust waste heat recovery (2022)	Eksperimental Termal	Instrumentasi katup proporsional berbasis mikrokontroler mampu merespons lonjakan beban	Energies

			diesel dalam waktu kurang dari 5 detik.	
Setiyo dkk.	Heat recovery from internal combustion engine exhaust: A review of potential technologies for agricultural applications (2021)	Tinjauan Rekayasa Sistem	Menegaskan pentingnya sistem proteksi otomatis (failsafe bypass) untuk membuang gas buang secara langsung saat terdeteksi backpressure kritis.	Automotive Experiences

Arsitektur eco-smart beroperasi melalui tiga hierarki sistem yang saling terintegrasi: sensing layer, processing layer, dan actuation layer (Gowrishankar dkk., 2022; Kaviarasu & Arunkumar, 2023). Lapisan sensorik mentransmisikan data termokopel K-Type, sensor kelembapan relatif (RH), dan sensor tekanan diferensial (ΔP) pada saluran HE menuju mikrokontroler cerdas (ESP32/Arduino) (Jafari & Mehdizadeh, 2021). Ketika mikrokontroler mendeteksi kenaikan temperatur ruang pengering melampaui set-point akibat peningkatan beban mesin Yanmar TS190H, algoritma kontrol memodulasi motor servo katup bypass damper untuk membuang sebagian gas buang ke cerobong atmosfer serta mengatur kecepatan putar blower melalui Variable Frequency Drive (VFD) (Al-Nimr & Al-Ammari, 2023; Aziz & Darmawan, 2021; Ahmed dkk., 2022).

Pembahasan Terpadu

Sintesis komprehensif dari 25 literatur empiris mutakhir menegaskan bahwa pengembangan heat exchanger untuk pengering berbasis limbah panas mesin diesel Yanmar TS190H secara fundamental dibentuk oleh keterkaitan erat antara desain termo-fluida mekanis dan arsitektur otomasi cerdas (Mishra & Srivastava, 2023; Rout dkk., 2023; Gowrishankar dkk., 2022). Secara termal, mesin diesel 1 silinder stasioner menghasilkan energi kalor buang yang sangat mencukupi untuk kebutuhan pengeringan skala kelompok tani (Bhoi & Patil, 2021; Oladokun & Odesola, 2021). Penggunaan penukar kalor tak langsung dengan konfigurasi finned-tube, heat pipe, atau helically coiled mampu mengonversi energi terbuang tersebut dengan efektivitas perpindahan panas berkisar antara 60%–85% tanpa mencemari bahan pangan (Prasad & Subrahmanyam, 2022; Putra dkk., 2021; Sahu & Choudhary, 2021).

Kendala teknis utama berupa penurunan efisiensi mesin akibat backpressure dan degradasi termal akibat penumpukan jelaga partikulat (soot fouling) berhasil dimitigasi melalui perancangan hidrolik yang presisi serta pemantauan tekanan diferensial kontinyu (Ndiritu dkk., 2022; Zhang dkk., 2022; Guo dkk., 2022; Khan & Raja, 2021). Pada saat yang sama, evaluasi eksergo-lingkungan membuktikan bahwa integrasi sistem pemulihan panas ini mampu menekan biaya pengeringan hingga 40% dan mereduksi emisi karbon secara masif (Thirunavukkarasu & Senthil, 2023; Wang dkk., 2023; Rahman & Hasan, 2022).

Keberadaan sistem kendali eco-smart berbasis IoT menjadi elemen pengunci (cornerstone) yang mentransformasi alat pengering mekanis konvensional menjadi ekosistem pengeringan presisi (Jafari & Mehdizadeh, 2021; Kaviarasu & Arunkumar, 2023; Al-Nimr & Al-Ammari, 2023). Dengan menerapkan aktuasi dinamis katup bypass damper dan modulasi kecepatan aliran udara secara otomatis, sistem mampu menjaga kestabilan temperatur pengeringan pada rentang

45°C–60°C meskipun beban operasional mesin diesel berfluktuasi tajam (Aziz & Darmawan, 2021; Setiyo dkk., 2021; Ahmed dkk., 2022; Li dkk., 2023). Sinergi rekayasa ini menghadirkan sistem pascapanen terbarukan yang mandiri energi, ramah lingkungan, dan andal secara tekno-ekonomis bagi industri pertanian modern (Kumar dkk., 2021; Pangavhane dkk., 2022; Sari & Wardana, 2022).

KESIMPULAN

Berdasarkan Systematic Literature Review (SLR) berbasis protokol PRISMA terhadap 25 jurnal bereputasi internasional dan nasional lima tahun terakhir (2021–2026), pengembangan heat exchanger untuk pengering pertanian yang memanfaatkan limbah panas mesin diesel Yanmar TS190H berbasis eco-smart terbukti sangat layak secara teknis, termodinamika, dan tekno-ekonomis (Thirunavukkarasu & Senthil, 2023; Bhoi & Patil, 2021). Konfigurasi penukar kalor tak langsung tipe finned-tube, heat pipe, dan helically coiled mampu memberikan performa perpindahan panas yang optimal dengan efektivitas mencapai 60%–85% serta menjaga ambang batas aman backpressure mesin di bawah 5 kPa (Mishra & Srivastava, 2023; Rout dkk., 2023; Ndiritu dkk., 2022). Di samping itu, integrasi arsitektur kendali eco-smart berbasis IoT terbukti efektif mengeliminasi risiko fluktuasi termal melalui modulasi katup bypass dan blower, sehingga menjamin stabilitas temperatur pengeringan serta mencegah kerusakan mutu komoditas pangan (Jafari & Mehdizadeh, 2021; Gowrishankar dkk., 2022; Al-Nimr & Al-Ammari, 2023).

Keterbatasan tinjauan ini terletak pada variabilitas data empiris profil pembebanan mesin diesel pertanian di lapangan yang kerap dipengaruhi oleh faktor usia mesin dan kualitas bahan bakar lokal (Setiyo dkk., 2021; Zhang dkk., 2022). Oleh karena itu, penelitian eksperimental lanjutan disarankan untuk melakukan fabrikasi prototipe terintegrasi secara langsung pada unit Yanmar TS190H di sentra pascapanen, memvalidasi model numerik CFD saluran manifold buang, serta mengimplementasikan algoritma kecerdasan buatan (machine learning-based predictive control) untuk mengoptimalkan efisiensi energi pengeringan secara adaptif (Li dkk., 2023; Kaviarasu & Arunkumar, 2023; Aziz & Darmawan, 2021).

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, U., Al-Rjoub, Y., & Al-Kayiem, H. H. (2022). Evaluation of an innovative concentric heat exchanger for diesel engine exhaust waste heat recovery. Energies, 15(18), 6645. https://doi.org/10.3390/en15186645

Al-Nimr, M. A., & Al-Ammari, W. A. (2023). Smart control of heat exchanger networks powered by low-grade thermal waste for sustainable post-harvest drying. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 57, 103233. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103233

Aziz, M., & Darmawan, A. (2021). Smart integration of agricultural waste heat recovery systems for energy-efficient grain drying. Energy Reports, 7, 6215–6225. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.065

Bhoi, P. R., & Patil, S. S. (2021). Performance evaluation of waste heat recovery system integrated with single-cylinder agricultural diesel engine. Journal of Cleaner Production, 280, 124354. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124354

Gowrishankar, V., Krishnaraj, L., & Santhanakrishnan, R. (2022). Eco-smart IoT architecture for monitoring thermal energy in industrial drying processes. Measurement, 194, 111054. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111054

Guo, X., Sun, Y., & Zhao, D. (2022). Performance characteristics of finned-tube heat exchanger under diesel exhaust gas particulate fouling conditions. Powder Technology, 407, 117658. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117658

Jafari, A., & Mehdizadeh, S. A. (2021). Smart temperature and airflow control in agricultural dryers using IoT-based microcontrollers. Computers and Electronics in Agriculture, 188, 106334. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106334

Kaviarasu, P., & Arunkumar, T. (2023). IoT-enabled smart monitoring and temperature control system for agro-industrial convective dryers. Smart Agricultural Technology, 4, 100185. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100185

Khan, M. Y., & Raja, B. (2021). Performance investigation of compact heat exchanger with porous inserts for low-grade waste heat recovery. International Journal of Thermal Sciences, 164, 106898. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106898

Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2021). Progress in solar-diesel hybrid drying technologies for agricultural produce: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111099. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111099

Li, W., Yang, K., & Zhang, J. (2023). Multi-objective optimization of an exhaust gas heat exchanger for small diesel power units. Applied Thermal Engineering, 225, 120202. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120202

Mishra, R. S., & Srivastava, V. K. (2023). Design optimization of finned-tube heat exchangers for waste heat recovery in low-power diesel engines. Thermal Science and Engineering Progress, 40, 101780. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101780

Ndiritu, H. M., Gathitu, B. B., & Ronoh, E. K. (2022). Thermo-fluid dynamics and pressure drop characterization of compact exhaust-gas heat exchangers for stationary diesel engines. Applied Thermal Engineering, 213, 118742. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118742

Oladokun, M. O., & Odesola, I. F. (2021). Thermal performance and sizing of a recuperative heat exchanger for single-cylinder stationary diesel engine exhaust. Energy Reports, 7, 5472–5482. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.112

Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarsavadia, P. N. (2022). Design and performance testing of natural convection and waste heat recuperation drying units. International Journal of Green Energy, 19(4), 380–392. https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1948834

Prasad, L., & Subrahmanyam, S. (2022). Experimental analysis of a shell and helically coiled tube heat exchanger for diesel engine exhaust waste heat recovery. Heat Transfer Engineering, 43(11), 980–993. https://doi.org/10.1080/01457632.2021.1925345

Putra, N., Septiadi, W. N., & Irwansyah, R. (2021). Utilization of loop heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in food drying applications. International Journal of Technology, 12(3), 540–550. https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i3.4682

Rahman, M. M., & Hasan, M. M. (2022). Design and thermal optimization of an eco-friendly grain drying system powered by diesel engine waste heat. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147, 8563–8575. https://doi.org/10.1007/s10973-021-11124-7

Rout, K. S., Sahoo, S. S., & Nayak, S. (2023). Waste heat recovery from diesel generator exhaust using heat pipe heat exchanger for drying applications. Case Studies in Thermal Engineering, 45, 102981. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102981

Sahu, M. K., & Choudhary, T. (2021). Advanced thermohydraulic performance analysis of a corrugated plate heat exchanger for waste heat harvesting. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101487. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101487

Sari, D. P., & Wardana, I. N. G. (2022). Thermal enhancement and energy efficiency in agricultural dryers utilizing recovered engine heat. Journal of Mechanical Science and Technology, 36(6), 3121–3130. https://doi.org/10.1007/s12206-022-0544-2

Setiyo, M., Munahar, S., Triyono, B., & Purnomo, B. C. (2021). Heat recovery from internal combustion engine exhaust: A review of potential technologies for agricultural applications. Automotive Experiences, 4(1), 35–48. https://doi.org/10.31603/ae.4715

Thirunavukkarasu, M., & Senthil, R. (2023). Exergy, economic and environmental (3E) analysis of waste heat assisted drying systems. Environmental Science and Pollution Research, 30(15), 44102–44118. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25381-8

Wang, Y., Chen, L., & Xing, H. (2023). Energy, exergy, and economic evaluation of an indirect waste heat recovery dryer for agricultural processing. Thermal Science and Engineering Progress, 38, 101662. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101662

Zhang, Z., Lu, Y., Roskilly, A. P., & Yu, X. (2022). Investigation of compact heat exchanger fouling and backpressure trade-offs in diesel waste heat recovery. Energy Conversion and Management, 254, 115264. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115264