

PEMANFAATAN PANAS KNALPOT YANMAR TS190H MELALUI *HEAT EXCHANGER*: TINJAUAN SISTEMATIS

Agay Priadi¹, Rifdarmon^{2*}, Martias², dan Iffarial Nanda²

Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang¹

Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang²
email: Reyzen0102@gmail.com¹

Abstract: *This systematic review examines the technical basis for recovering exhaust heat from the Yanmar TS190H diesel engine through a heat exchanger and identifies variables that should guide prototype testing. Thirteen primary studies published between 2020 and 2026 were selected through PRISMA-oriented screening and evaluated for methodological clarity and relevance. Evidence was organized around exhaust-heat characteristics, operating parameters, exchanger geometry, backpressure, fouling, and direct water heating. Because engine scales, methods, and performance indicators differed substantially, the findings were synthesized narratively. Exhaust temperature and mass flow, engine load, water flow rate, pipe dimensions, heat-transfer area, flow arrangement, and exhaust resistance consistently governed system performance. A double-pipe or concentric-tube counterflow configuration emerged as the most practical starting point because it combines simple fabrication, cleaning access, and controllable pressure loss. The review proposes a Yanmar TS190H-specific thermal-hydraulic operating window to integrate heat recovery, pressure constraints, and maintainability before experimental validation.*

Keywords: *Heat Exchanger, Diesel Exhaust Heat, Yanmar TS190H, Water Heating.*

Abstrak: Tinjauan sistematis ini mengkaji dasar teknis pemanfaatan panas knalpot mesin diesel Yanmar TS190H melalui heat exchanger dan mengidentifikasi variabel yang perlu dijadikan acuan dalam pengujian prototipe. Tiga belas studi primer terbitan 2020–2026 diseleksi melalui tahapan berorientasi PRISMA, kemudian dinilai berdasarkan kejelasan metode dan relevansinya terhadap objek kajian. Bukti dikelompokkan menurut karakteristik panas gas buang, parameter operasi, geometri alat, backpressure, fouling, dan pemanasan air langsung. Perbedaan skala mesin, metode, dan indikator kinerja menyebabkan temuan disintesis secara naratif. Temperatur dan laju massa gas buang, beban mesin, debit air, dimensi pipa, luas perpindahan panas, susunan aliran, dan hambatan knalpot secara konsisten menentukan kinerja sistem. Konfigurasi double-pipe atau concentric-tube counterflow menjadi pilihan awal paling praktis karena mudah dibuat, dibersihkan, dan dikendalikan kerugiannya. Kajian ini merumuskan jendela operasi termal-hidrolik khusus Yanmar TS190H untuk mengintegrasikan pemulihan panas, batas tekanan, dan kemudahan perawatan sebelum validasi eksperimental.

Kata Kunci: Heat Exchanger, Panas Knalpot Diesel, Yanmar TS190H, Pemanasan Air.

A. Pendahuluan

Mesin diesel masih digunakan pada sistem stasioner karena tangguh, mampu bekerja pada beban berubah, dan relatif mudah dirawat. Namun, sebagian energi bahan bakar tidak menjadi daya poros, melainkan keluar melalui gas buang, pendinginan, gesekan, dan radiasi. Gas knalpot menarik untuk dimanfaatkan karena masih memiliki temperatur yang memungkinkan pemindahan panas. Pada Yanmar TS190H, energi tersebut dapat dialihkan ke air melalui *heat exchanger* pada jalur knalpot. Pendekatan langsung lebih sederhana daripada konversi panas menjadi daya, tetapi kapasitas

pemulihan tidak hanya ditentukan oleh temperatur. Laju massa gas, beban mesin, durasi operasi, dan kemampuan alat mempertahankan beda temperatur juga berpengaruh. Karena itu, pengembangan sistem harus menghubungkan karakteristik sumber panas, rancangan alat, dan kebutuhan pemanasan air (Sahu et al., 2022; Orido et al., 2023).

Kondisi gas buang berubah selama *cold start*, pemanasan, dan pergantian beban. Temperatur serta kecepatan gas bersama-sama memengaruhi perpindahan panas (Jiang et al., 2023), sedangkan profil energi pada operasi transien tidak selalu tetap (Donateo et al., 2024). Studi terdahulu menunjukkan bahwa panas knalpot dapat digunakan untuk air panas dan bahwa debit air serta beban mesin memengaruhi temperatur keluaran (Nguyen et al., 2021; Luo et al., 2023). Analisis *concentric-tube heat exchanger* juga menempatkan diameter, panjang pipa, celah annulus, dan kondisi aliran sebagai variabel yang saling bergantung (Ali et al., 2025; Rasheed et al., 2026). Pada saat yang sama, penguatan turbulensi dapat meningkatkan *pressure drop*, sedangkan deposit memperbesar resistansi termal dan menurunkan kestabilan kinerja (Aiello et al., 2020; Martos et al., 2023).

Kesenjangan penelitian terletak pada belum adanya sintesis yang secara khusus menautkan karakteristik panas knalpot Yanmar TS190H dengan geometri *heat exchanger*, debit air, *backpressure*, *fouling*, dan kebutuhan pemanasan air dalam satu kerangka. Bukti yang tersedia didominasi mesin kapal, kendaraan berat, generator, atau sistem berkapasitas lebih besar sehingga nilai optimum tidak dapat dipindahkan langsung. Selain itu, indikator termal, hidraulik, dan pemeliharaan sering dinilai secara terpisah. Kebaruan kajian ini ialah perumusan jendela operasi termal–hidraulik yang menilai desain sebagai kompromi antara panas yang dipindahkan, temperatur dan debit air, *pressure drop*, risiko deposit, serta akses pembersihan. Kerangka ini mencegah pemilihan geometri hanya berdasarkan temperatur keluaran tertinggi.

Kajian ini bertujuan menyintesis bukti ilmiah tentang pemanfaatan panas knalpot mesin diesel dan merumuskan arah pengembangan bagi Yanmar TS190H. Variabel yang dianalisis mencakup kondisi gas buang, beban mesin, debit air, geometri pipa, luas permukaan, pola aliran, temperatur air, panas yang dipulihkan, efektivitas, *pressure drop*, *backpressure*, dan *fouling*. Kajian dibatasi pada publikasi 2020–2026 serta tidak menetapkan dimensi final tanpa pengujian. Karena penelitian ini merupakan SLR, hipotesis kuantitatif tidak digunakan. Sebagai padanannya, diajukan proposisi bahwa *double-pipe* atau *concentric-tube counterflow* merupakan titik awal paling rasional apabila mampu bekerja dalam jendela operasi termal–hidraulik yang menjaga manfaat panas, tekanan balik, dan kemudahan perawatan secara bersamaan.

B. Metodologi Penelitian

Desain Kajian. Penelitian ini menggunakan *systematic literature review* untuk mengidentifikasi, menyeleksi, mengevaluasi, dan menyintesis publikasi mengenai pemanfaatan panas knalpot mesin diesel melalui *heat exchanger*. Alur kajian disusun berdasarkan prinsip PRISMA 2020, meliputi identifikasi sumber, penghapusan duplikasi, penyaringan judul dan abstrak, penilaian teks lengkap, serta penetapan studi yang masuk ke dalam sintesis (Page et al., 2021). Penelitian tidak memiliki tempat eksperimen atau lokasi lapangan karena seluruh data bersumber dari dokumen ilmiah yang dapat ditelusuri. Unit analisisnya adalah artikel, bukan manusia, mesin uji, atau sampel fisik. Perbedaan skala mesin, konfigurasi alat, metode pengujian, dan indikator kinerja menyebabkan meta-analisis tidak diterapkan. Bukti dianalisis melalui sintesis naratif-tematik agar hubungan antara kondisi studi dan kesimpulan tetap dapat ditelusuri tanpa memaksakan penggabungan angka yang tidak sebanding. Sumber dan Strategi Pencarian. Penelusuran dilakukan melalui Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Taylor & Francis, dan Google Scholar untuk pelacakan sitasi. Rentang publikasi dibatasi pada 2020–

2026. Kombinasi kata kunci mencakup diesel engine, exhaust gas, *waste heat recovery*, *heat exchanger*, *double-pipe*, *concentric-tube*, *counterflow*, *backpressure*, *fouling*, *water heating*, dan *exhaust heat recovery*. Operator Boolean disesuaikan dengan fasilitas masing-masing basis data. Tahap awal mencakup pemeriksaan judul, abstrak, dan kata kunci; artikel yang relevan kemudian dibaca penuh dan diverifikasi melalui DOI. Setelah penyelarasan dengan batas referensi template, korpus akhir terdiri atas 13 studi primer yang paling langsung mendukung karakteristik panas knalpot, geometri alat, *backpressure*, *fouling*, dan pemanasan air, serta dua rujukan metodologis. Pembatasan ini membuat sintesis lebih terfokus, tetapi konsekuensinya adalah beberapa aplikasi alternatif seperti ORC, desalinasi multiguna, penyimpanan termal bertingkat, dan kajian mikrobiologi mendalam tidak dibahas sebagai tema utama. Kriteria Seleksi dan Penilaian Mutu. Artikel disertakan apabila diterbitkan pada 2020–2026, memiliki identitas publikasi yang dapat diverifikasi, tersedia dalam teks lengkap, serta menyajikan metode dan temuan teknis yang relevan dengan panas gas buang, rancangan *heat exchanger*, aliran fluida, tekanan balik, *fouling*, atau pemanasan air. Publikasi dikeluarkan apabila hanya membahas emisi tanpa analisis energi, tidak menyediakan hasil yang dapat diekstraksi, merupakan duplikasi, atau membahas teknologi yang terlalu jauh dari kebutuhan Yanmar TS190H. Mutu studi ditelaah berdasarkan kejelasan tujuan, kesesuaian metode, transparansi kondisi pengujian, validasi eksperimen atau model, kelengkapan indikator, serta konsistensi antara data dan kesimpulan. Prinsip penilaian tersebut mengadaptasi QuADS karena kumpulan studi mencakup eksperimen, simulasi, dan pemodelan termodinamika (Harrison et al., 2021). Studi tidak dikeluarkan hanya karena hasilnya berbeda; perbedaan justru dipertahankan untuk menunjukkan batas transferabilitas bukti. Definisi Operasional Variabel, Temperatur gas buang didefinisikan sebagai suhu gas pada sisi masuk atau keluar *heat exchanger* yang dilaporkan dalam setiap studi. Laju massa gas adalah jumlah massa gas yang melewati saluran per satuan waktu dan digunakan untuk menilai kapasitas panas sumber. Beban mesin menunjukkan tingkat operasi yang memengaruhi pembakaran, temperatur, dan aliran gas. Debit air adalah volume atau massa air yang mengalir per satuan waktu. Panas yang dipulihkan adalah kenaikan energi air akibat perpindahan panas dari gas buang. Efektivitas *heat exchanger* merupakan perbandingan perpindahan panas aktual terhadap perpindahan panas maksimum yang secara teoritis mungkin. *Backpressure* adalah peningkatan tekanan pada sisi hulu sistem knalpot akibat hambatan alat. *Pressure drop* adalah selisih tekanan antara sisi masuk dan keluar komponen. *Fouling* didefinisikan sebagai akumulasi deposit pada permukaan perpindahan panas yang menambah resistansi termal atau hambatan aliran. Geometri mencakup panjang, diameter, celah annulus, luas permukaan, dan susunan aliran yang dilaporkan pada studi. Ekstraksi dan Analisis Data, data diekstraksi ke dalam matriks yang memuat penulis, tahun, fokus kajian, metode, sistem yang diuji, variabel operasi, dan temuan utama. Nilai dari mesin lain tidak dikonversi menjadi ukuran desain final untuk Yanmar TS190H. Analisis dilakukan dengan membandingkan kesamaan pola, perbedaan hasil, hubungan sebab-akibat, dan batas penerapan antarstudi. Temuan dikelompokkan ke dalam lima tema: potensi dan karakteristik panas knalpot, pengaruh parameter operasi, konfigurasi *heat exchanger*, keseimbangan perpindahan panas dengan *backpressure* dan *fouling*, serta pemanfaatan panas untuk air. Tabel ekstraksi digunakan untuk menjaga keterlacakan antara sumber dan sintesis. Hasil akhir kemudian dipakai untuk merumuskan jendela operasi termal–hidraulik, yaitu kerangka yang menghubungkan beban mesin, kondisi gas, debit air, geometri, keluaran panas, *pressure drop*, dan kebutuhan pemeliharaan. Kerangka tersebut ditujukan sebagai dasar penyusunan eksperimen, bukan pengganti pengujian langsung.

C. Hasil dan Pembahasan

Hasil seleksi menunjukkan bahwa penelitian pemulihan panas knalpot berkembang pada tiga arah utama, yaitu karakterisasi sumber panas, pengembangan geometri, dan pengendalian batas operasi. Tabel 1 merangkum 13 studi primer yang dipertahankan setelah penyesuaian batas referensi template. Pengurangan jumlah studi dilakukan secara konsisten pada tabel, narasi, dan daftar pustaka agar tidak ada sumber yang menggantung.

Tabel 1. Ekstraksi Studi Utama

No	Penulis dan Tahun	Fokus Kajian	Metode	Temuan Utama
1	Sahu et al. (2022)	Potensi panas knalpot dan simulasi pemulihan	Eksperimen dan simulasi numerik	Panas yang tersedia berubah menurut beban dan dapat dipulihkan melalui <i>double-pipe counterflow heat exchanger</i> .
2	Jiang et al. (2023)	Pengaruh temperatur dan kecepatan gas	Pemodelan dan simulasi	Temperatur serta kecepatan aliran bekerja bersama dan respons perpindahan panas tidak selalu linear.
3	Donateo et al. (2024)	Kandungan panas pada operasi nyata dan <i>cold start</i>	Analisis data kendaraan berat	Kondisi awal, beban, dan pola operasi mengubah temperatur serta laju massa gas.
4	Nguyen et al. (2021)	Sistem air panas berbasis panas gas buang	Neraca energi dan analisis ekonomi	Pemulihan panas dapat menyediakan air panas dan menekan konsumsi bahan bakar pemanas.
5	Luo et al. (2023)	<i>Exhaust-gas heat exchanger</i> pada mesin diesel kecil-menengah	Eksperimen	Kinerja dipengaruhi oleh beban dan debit air serta dapat menghasilkan temperatur air fungsional.
6	Ali et al. (2025)	Analisis parametrik <i>concentric-tube heat exchanger</i>	Termodinamika dan eksergo-lingkungan Pemodelan energi, eksergi, ekonomi, dan lingkungan	Diameter lebih kecil dan alat lebih panjang meningkatkan pemulihan, tetapi menambah kebutuhan aliran.
7	Rasheed et al. (2026)	Evaluasi 4E pemanasan awal air	Eksperimen dan CFD	Kondisi sisi gas dominan; debit air dan energi pemompaan menentukan manfaat bersih.
8	Soundarajan dan Selvaraj (2023)	<i>Finned double-pipe heat exchanger</i>	Eksperimen dan CFD	Sirip memperbesar area dan turbulensi, tetapi juga meningkatkan hambatan dan potensi deposit.
9	Martos et al. (2023)	Pemodelan katup exhaust <i>backpressure</i>	Eksperimen dan CFD	Geometri hambatan serta laju massa gas sangat memengaruhi tekanan balik.
10	Aiello et al. (2020)	Mekanisme <i>fouling</i> pada pemulihan panas	Eksperimen <i>fouling</i>	Deposit menaikkan resistansi termal dan <i>pressure drop</i> sehingga kinerja menurun.

No	Penulis dan Tahun	Fokus Kajian	Metode	Temuan Utama
11	Orido et al. (2023)	Hybrid <i>recuperative heat exchanger</i> generator diesel	Eksperimen	Gas buang mesin stasioner dapat dimanfaatkan melalui konfigurasi <i>recuperative</i> .
12	Towhid et al. (2025)	Pengolahan air berbasis panas knalpot kapal	Perancangan dan pengujian	Panas gas buang dapat digunakan untuk pengolahan air melalui <i>shell-and-tube heat exchanger</i> .
13	Di Battista et al. (2025)	Pemulihan energi bertingkat	Pemodelan berbasis data eksperimen	Manfaat bruto berkurang setelah kerugian <i>backpressure</i> diperhitungkan.

Potensi dan Karakteristik Sumber Panas

Panas knalpot merupakan sumber energi termal yang layak dimanfaatkan, tetapi kapasitasnya berubah selama operasi. Beban mesin, temperatur, laju massa, kecepatan aliran, dan durasi kerja mengendalikan jumlah energi yang tersedia. Sahu et al. (2022) menunjukkan bahwa potensi panas meningkat bersama perubahan kondisi beban, sedangkan Orido et al. (2023) memperlihatkan bahwa gas buang mesin diesel stasioner dapat dimanfaatkan melalui konfigurasi *recuperative*. Temuan tersebut mendukung penggunaan Yanmar TS190H sebagai sumber panas, tetapi tidak memberikan ukuran desain yang dapat langsung diterapkan karena karakter mesin dan salurannya berbeda.

Perubahan sumber panas menjadi semakin penting pada kondisi transien. Jiang et al. (2023) menunjukkan bahwa temperatur dan kecepatan gas memengaruhi perpindahan panas secara bersamaan, sementara Donateo et al. (2024) menegaskan bahwa *cold start* dan perubahan beban menghasilkan profil energi yang tidak konstan. Oleh sebab itu, rancangan Yanmar TS190H harus diawali dengan pemetaan temperatur gas sebelum dan sesudah alat pada beberapa tingkat beban. Data literatur berfungsi untuk menentukan variabel pengujian dan kecenderungan hubungan, bukan untuk menggantikan pengukuran aktual.

Pengaruh Parameter Operasi

Kinerja *heat exchanger* terbentuk melalui interaksi sisi gas dan sisi air. Debit air yang lebih besar dapat meningkatkan massa fluida yang menerima panas, tetapi kenaikan temperatur tiap satuan massa dapat menurun. Sebaliknya, debit kecil cenderung menghasilkan temperatur keluaran lebih tinggi dengan kapasitas pemanasan yang terbatas. Karena itu, temperatur air maksimum tidak cukup digunakan sebagai indikator tunggal. Evaluasi perlu memasukkan debit, panas yang dipulihkan, efektivitas, waktu menuju kondisi stabil, dan *pressure drop*.

Ali et al. (2025) menunjukkan bahwa diameter pipa, panjang alat, dan kondisi aliran pada *concentric-tube heat exchanger* memengaruhi kinerja secara serentak. Rasheed et al. (2026) memperluas evaluasi tersebut dengan menunjukkan bahwa manfaat energi tidak hanya ditentukan oleh perpindahan panas, tetapi juga oleh kebutuhan pemompaan dan kerugian sistem. Implikasinya bagi Yanmar TS190H adalah perlunya variasi debit air dan geometri dalam satu rancangan pengujian, sehingga peningkatan temperatur tidak dinilai terpisah dari beban hidraulik.

Konfigurasi dan Geometri *Heat Exchanger*

Bukti yang tersedia menempatkan *double-pipe* atau *concentric-tube counterflow* sebagai rancangan awal paling rasional untuk mesin kecil. Luo et al. (2023) menunjukkan bahwa *exhaust-gas heat exchanger* pada mesin diesel kecil-menengah mampu

menghasilkan temperatur air fungsional ketika debit disesuaikan. Konfigurasi pipa konsentris memberikan pemisahan fluida yang jelas, memungkinkan variasi panjang dan diameter, serta relatif mudah dibongkar untuk pemeriksaan. Keunggulan praktis tersebut penting pada tahap prototipe karena perubahan desain perlu dilakukan tanpa sistem manufaktur yang kompleks.

Penguatan perpindahan panas melalui sirip dapat meningkatkan luas permukaan dan turbulensi. Soundararajan dan Selvaraj (2023) memperlihatkan bahwa *finned double-pipe heat exchanger* mampu memperbaiki kinerja termal, tetapi penambahan elemen internal juga dapat memperbesar hambatan dan area penangkapan deposit. Oleh karena itu, sirip sebaiknya diperlakukan sebagai opsi pengembangan setelah kinerja pipa polos diketahui. Pada Yanmar TS190H, rancangan dasar yang sederhana lebih sesuai untuk memisahkan pengaruh panjang, diameter, debit, dan pola aliran sebelum modifikasi tambahan diterapkan.

Keseimbangan Perpindahan Panas, *Backpressure*, dan *Fouling*

Peningkatan perpindahan panas tidak selalu menghasilkan keuntungan bersih. Saluran yang lebih sempit, lintasan lebih panjang, atau elemen pengganggu aliran dapat memperkuat konveksi, tetapi sekaligus meningkatkan *pressure drop*. Martos et al. (2023) menunjukkan bahwa geometri hambatan dan laju massa gas berpengaruh kuat terhadap exhaust *backpressure*. Di Battista et al. (2025) juga menegaskan bahwa manfaat pemulihan energi perlu dinilai setelah kerugian tekanan diperhitungkan. Bagi mesin satu silinder, peningkatan tekanan balik perlu dipantau karena dapat mengganggu proses pembuangan gas.

Fouling menambah dimensi waktu pada evaluasi desain. Aiello et al. (2020) menunjukkan bahwa deposit pada permukaan pemulihan panas meningkatkan resistansi termal dan hambatan aliran. Artinya, alat yang memiliki performa awal tinggi belum tentu mempertahankan manfaatnya setelah digunakan. Akses pembersihan, ukuran saluran, kondisi permukaan, dan kemudahan pembongkaran harus dinilai sebagai bagian dari kinerja, bukan sebagai persoalan pemeliharaan yang terpisah. Jendela operasi yang diusulkan karena itu memasukkan batas tekanan dan risiko penurunan performa, bukan hanya keluaran panas.

Pemanfaatan Panas untuk Air

Pemanasan air langsung paling sesuai untuk tahap awal pengembangan karena rantai konversinya pendek dan kebutuhan komponennya terbatas. Nguyen et al. (2021) menunjukkan bahwa pemulihan panas gas buang dapat mengurangi kebutuhan bahan bakar tambahan untuk penyediaan air panas. Towhid et al. (2025) juga memperlihatkan bahwa energi knalpot dapat diarahkan ke pengolahan air melalui *heat exchanger*. Kedua studi tersebut berasal dari konteks aplikasi yang berbeda, tetapi sama-sama mendukung pemanfaatan langsung ketika kebutuhan akhir berbentuk panas, bukan daya.

Pada Yanmar TS190H, tujuan pemanasan air harus diterjemahkan menjadi indikator yang terukur, yaitu temperatur masuk dan keluar, debit, panas yang dipulihkan, waktu pemanasan, serta kestabilan operasi. Kajian ini tidak memasukkan pembahasan mikrobiologi mendalam karena fokus utama adalah pengembangan *heat exchanger*. Apabila air selanjutnya digunakan untuk proses termal tertentu, validasi temperatur-waktu harus dilakukan dalam penelitian terpisah dengan metode yang sesuai. Pembatasan ini menjaga agar rekomendasi desain tetap sejalan dengan bukti teknik mesin yang dianalisis.

Implikasi bagi Validasi Eksperimental

Korpus yang telah dipadatkan menunjukkan bahwa validasi prototipe sebaiknya

menggunakan rancangan pengujian bertahap. Tahap pertama memetakan sumber panas pada beberapa beban tanpa *heat exchanger* untuk memperoleh kondisi dasar temperatur dan hambatan knalpot. Tahap kedua memasang konfigurasi pipa polos dan membandingkan beberapa debit air, sedangkan tahap berikutnya mengevaluasi perubahan panjang, diameter, atau penambahan permukaan. Urutan tersebut membantu memisahkan pengaruh geometri dari perubahan sumber panas dan mencegah kesimpulan yang hanya didasarkan pada satu kondisi operasi.

Setiap variasi perlu dinilai menggunakan indikator yang sama agar hasilnya dapat dibandingkan. Data minimum mencakup temperatur gas masuk-keluar, temperatur air masuk-keluar, debit air, waktu menuju kondisi stabil, panas yang dipulihkan, dan *pressure drop*. Kondisi permukaan juga perlu didokumentasikan setelah sejumlah waktu operasi untuk melihat kecenderungan *fouling*. Dengan rancangan tersebut, jendela operasi termal–hidraulik dapat diisi berdasarkan data aktual dan digunakan untuk memilih konfigurasi yang memberikan manfaat termal tanpa menghasilkan tekanan balik berlebihan. Pencatatan kondisi awal tanpa alat juga diperlukan sebagai pembanding agar perubahan temperatur dan tekanan dapat dikaitkan secara langsung dengan pemasangan *heat exchanger*. Pengulangan pengujian pada kondisi yang sama perlu dilakukan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi operasi dan memastikan bahwa kecenderungan yang terbaca bukan akibat perubahan beban sesaat.

Sintesis tematik pada Tabel 2 menghubungkan bukti utama dengan kebutuhan desain dan pengujian Yanmar TS190H.

Tabel 2. Sintesis Tematik dan Implikasi Desain

Tema	Referensi Utama	Implikasi bagi Yanmar TS190H
Potensi panas knalpot	Sahu et al. (2022); Jiang et al. (2023); Donateo et al. (2024); Orido et al. (2023)	Karakterisasi diperlukan pada variasi beban, temperatur, aliran gas, dan durasi operasi.
Parameter termal–hidraulik	Jiang et al. (2023); Ali et al. (2025); Rasheed et al. (2026)	Debit, panjang, diameter, celah annulus, dan pola aliran harus dinilai secara bersamaan.
Konfigurasi alat	Luo et al. (2023); Soundararajan dan Selvaraj (2023)	<i>Double-pipe</i> atau <i>concentric-tube counterflow</i> menjadi titik awal yang sederhana dan mudah dibersihkan.
<i>Backpressure</i> dan <i>fouling</i>	Aiello et al. (2020); Martos et al. (2023); Di Battista et al. (2025)	Peningkatan turbulensi harus dibatasi agar tidak menimbulkan hambatan berlebihan dan penurunan kinerja.
Pemanfaatan air	Nguyen et al. (2021); Towhid et al. (2025)	Kinerja dinilai melalui temperatur, debit, panas yang dipulihkan, dan kebutuhan penggunaan akhir.

Jendela Operasi Termal–Hidraulik

Sintesis seluruh tema menghasilkan jendela operasi termal–hidraulik untuk Yanmar TS190H. Kerangka ini menggambarkan kombinasi beban mesin, temperatur serta aliran gas, debit air, geometri, temperatur keluaran, panas yang dipulihkan, *pressure drop*, dan kondisi pemeliharaan yang memungkinkan alat bekerja secara efektif. Jendela tersebut bukan angka optimum tunggal, melainkan rentang aman yang harus ditentukan melalui pengujian. Pendekatan ini menghindari keputusan desain yang hanya mengejar temperatur air tertinggi tanpa mempertimbangkan kapasitas aliran dan dampaknya terhadap knalpot. Tabel 2 merangkum hubungan tema dengan kebutuhan pengujian, sedangkan Tabel 3 memperlihatkan kesenjangan penelitian dan kebaruan kajian. Kontribusi utama artikel ini adalah penataan bukti lintas skala menjadi kerangka eksperimen yang relevan bagi mesin satu silinder. Dengan demikian, *double-pipe* atau *concentric-tube counterflow* diposisikan

sebagai rancangan dasar yang perlu divalidasi, bukan sebagai desain final yang telah terbukti optimal. Kesimpulan desain baru dapat dibuat setelah data temperatur, debit, panas, tekanan, dan kondisi permukaan diperoleh secara bersamaan.

Tabel 3. Kesenjangan Penelitian dan Kebaruan Kajian

Kesenjangan	Dampak	Kebaruan/Originalitas
Objek penelitian	Bukti didominasi mesin kapal, kendaraan berat, generator, atau sistem berkapasitas lebih besar.	Literatur dikontekstualisasikan pada mesin satu silinder Yanmar TS190H.
Integrasi indikator	Temperatur, panas, <i>pressure drop</i> , <i>backpressure</i> , dan <i>fouling</i> sering dianalisis terpisah.	Indikator disatukan dalam jendela operasi termal–hidraulik.
Konfigurasi desain	Efektivitas termal sering lebih diutamakan daripada fabrikasi dan pembersihan.	<i>Double-pipe</i> atau <i>concentric-tube counterflow</i> diposisikan sebagai rancangan dasar untuk validasi.
Pemanfaatan akhir	Pemulihan panas belum selalu dikaitkan dengan kebutuhan air dan batas operasi mesin.	Evaluasi diarahkan pada temperatur, debit, panas yang dipulihkan, dan keamanan sistem knalpot.

D. Penutup

Kajian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan panas knalpot Yanmar TS190H memerlukan integrasi antara karakteristik sumber panas, parameter air, geometri alat, dan batas operasional mesin. Bukti yang paling relevan mendukung *double-pipe* atau *concentric-tube counterflow* sebagai rancangan awal karena sederhana, mudah dimodifikasi, dan menyediakan akses pembersihan. Kontribusi utama artikel adalah jendela operasi termal–hidraulik yang menghubungkan keluaran panas, debit air, *pressure drop*, *backpressure*, *fouling*, dan kemudahan perawatan. Kerangka tersebut tidak menetapkan ukuran optimum, tetapi menyediakan dasar yang lebih terarah untuk menyusun pengujian prototipe pada Yanmar TS190H. Penelitian lanjutan perlu memetakan kondisi dasar gas buang pada beberapa beban, kemudian menguji variasi debit, panjang, diameter, dan pola aliran dengan indikator yang konsisten. Pengukuran sebaiknya mencakup temperatur gas dan air, panas yang dipulihkan, waktu mencapai kondisi stabil, konsumsi bahan bakar, serta *pressure drop*. Pemeriksaan deposit dan kemudahan pembersihan juga perlu dimasukkan dalam evaluasi jangka menengah. Apabila air panas diarahkan pada kebutuhan termal khusus, validasi tambahan harus dilakukan menggunakan standar proses yang sesuai agar manfaat panas tidak ditafsirkan di luar bukti yang tersedia.

Daftar Pustaka

- Aiello, V. C., Kini, G., Staedter, M. A., & Garimella, S. (2020). Investigation of fouling mechanisms for diesel engine exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115973. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115973>
- Ali, S., Alsayah, A. M., Kadhim, S. A., Fahs, M., Faraj, J., Khaled, M., Salameh, T., & Alkasrawi, M. (2025). Parametric thermodynamic and exergo-environmental analysis of a concentric-tube heat exchanger for exhaust-gas heat recovery. *Energy Conversion and Management*, X, 27, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101155>
- Di Battista, D., Di Prospero, F., Di Giovine, G., Fatigati, F., & Cipollone, R. (2025). Dual-stage energy recovery from internal combustion engines. *Energies*, 18(3), 623. <https://doi.org/10.3390/en18030623>
- Donateo, T., Cutuli, P., Vilotta, N., Algieri, A., & Morrone, P. (2024). Analysis of the heat content of exhaust gases from a heavy-duty diesel engine under real-world driving

- conditions and cold start operation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2893(1), 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012103>
- Harrison, R., Jones, B., Gardner, P., & Lawton, R. (2021). Quality assessment with diverse studies (QuADS): An appraisal tool for methodological and reporting quality in systematic reviews of mixed- or multi-method studies. *BMC Health Services Research*, 21, 144. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06122-y>
- Jiang, D., Yu, H., Wang, Z., Glowacz, A., Królczyk, G., & Li, Z. (2023). Influence of exhaust temperature and flow velocity of marine diesel engines on exhaust gas boiler heat transfer performance. *Sustainability*, 15(1), 753. <https://doi.org/10.3390/su15010753>
- Luo, L., Fan, Y., Wang, Y., Ni, P., Zhang, X., & Xi, G. (2023). Experiment study on the exhaust-gas heat exchanger for small and medium-sized marine diesel engine. *Energy Engineering*, 120(1), 125–145. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.022295>
- Martos, F. J., Soriano, J. A., Braic, A., Fernández-Yáñez, P., & Armas, O. (2023). A CFD modelling approach for the operation analysis of an exhaust backpressure valve used in a Euro 6 diesel engine. *Energies*, 16(10), 4112. <https://doi.org/10.3390/en16104112>
- Nguyen, N.-H., Lee, D.-Y., Garud, K. S., & Lee, M.-Y. (2021). Energy saving and economic evaluations of exhaust waste heat recovery hot water supply system for resort. *Symmetry*, 13(4), 624. <https://doi.org/10.3390/sym13040624>
- Orido, G. O., Ronoh, E. K., Ajwang, P. O., & Gathitu, B. B. (2023). Performance assessment of hybrid recuperative heat exchanger for diesel engine generated exhaust gas. *International Journal of Thermofluids*, 19, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100392>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rasheed, R. H., Ali, S., Alsayah, A. M., Alshukri, M. J., Kadhim, S. A., Faraj, J., Castelain, C., Fahs, M., & Khaled, M. (2026). Comprehensive 4E assessment of diesel exhaust waste heat recovery for domestic water preheating using a concentric-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management: X*, 30, 101731. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101731>
- Sahu, M. K., Singh, A. K., & Choudhary, T. (2022). Experimental investigation of thermal potential at diesel engine exhaust and numerical simulation of heat recovery in heat exchangers. *Materials Today: Proceedings*, 56, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.076>
- Soundararajan, S., & Selvaraj, M. (2023). Investigations of protracted finned double pipe heat exchanger system for waste heat recovery from diesel engine exhaust. *Thermal Science*, 27(5A), 3783–3793. <https://doi.org/10.2298/TSCI230212143S>
- Towhid, M. S. A., Islam, M. R., Khalikujjaman, M., & Costa, B. T. (2025). Waste heat recovery-based seawater desalination for sustainable maritime operations: A study on heat transfer, techno-economic feasibility, and environmental impact. *Journal of ETA Maritime Science*, 13(3), 260–276. <https://doi.org/10.4274/jems.2025.76259>