

Pengaruh *Running Hours Injector* Terhadap Kualitas Pembakaran Mesin Induk Kapal AHTS Logindo Stamina

Daffa Raihan Pradana¹, Frenki Imanto², Maulidiah Rahmawati³, Antonius Edy Kristiyono⁴, Agus Prawoto⁵

^{1,2,3,4,5}Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal (TRPK), Politeknik Pelayaran (Polteknepel) Surabaya
Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur
Email: daffaraihann22@gmail.com, frenk.fr1@gmail.com, maulidiah@polteknepel-sby.ac.id,
edyantonius25@gmail.com, prawotoagus35@gmail.com

ABSTRAK

Injector merupakan komponen penting pada mesin diesel yang berfungsi mengabutkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi, sehingga kualitas pengabutan sangat menentukan kesempurnaan proses pembakaran dan kinerja mesin induk kapal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh serta signifikansi *running hours injector* terhadap kualitas pembakaran. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan analisis statistik inferensial melalui uji normalitas, uji homogenitas, dan uji *One Way ANOVA*. Data diperoleh melalui observasi langsung, dokumentasi, dan studi literatur berdasarkan *instruction manual book* mesin induk pada kapal AHTS Logindo Stamina milik PT. Logindo Samudramakmur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *running hours injector* menyebabkan penurunan kinerja *injector* akibat keausan komponen dan endapan kotoran, sehingga atomisasi bahan bakar menjadi tidak sempurna (*after dripping*) dan temperatur gas buang tidak stabil. Hasil uji *One Way ANOVA* membuktikan adanya pengaruh yang signifikan antara *running hours injector* dan kualitas pembakaran, di mana kondisi *after maintenance* menghasilkan pembakaran paling optimal, sedangkan kondisi *upnormal* menunjukkan penurunan performa *injector* yang berdampak pada efisiensi pembakaran mesin induk kapal.

Kata kunci: *Running hours, Injector, Nozzle dan Bahan Bakar.*

ABSTRACT

The injector is a crucial component in a diesel engine that functions to atomize fuel into the combustion chamber under high pressure; therefore, the quality of atomization greatly determines combustion efficiency and the performance of the ship's main engine. This study aims to determine the effect and significance of injector running hours on combustion quality. The research employed a quantitative method with inferential statistical analysis, including normality tests, homogeneity tests, and One Way ANOVA. The data were obtained through direct observation, documentation, and literature study based on the main engine instruction manual book on board the AHTS Logindo Stamina vessel owned by PT. Logindo Samudramakmur. The results indicate that increasing injector running hours leads to a decline in injector performance due to component wear and deposit accumulation, resulting in imperfect fuel atomization (after dripping) and unstable exhaust gas temperature. The One Way ANOVA results confirm a significant effect of injector running hours on combustion quality, where the after maintenance condition produces the most optimal combustion, while the abnormal condition shows a decrease in injector performance that negatively affects the combustion efficiency of the ship's main engine.

Keywords: *Running hours, Injector, Nozzle and Fuel*

Pendahuluan

Industri maritim memegang peran fundamental dalam rantai perdagangan global, di mana kelancaran mobilitas transportasi laut sangat bergantung pada kinerja mesin induk kapal. Kualitas pembakaran di dalam mesin induk, yang umumnya menggunakan mesin diesel, menjadi penentu utama efisiensi bahan bakar dan performa mesin secara keseluruhan. Untuk mencapai tingkat pembakaran sempurna ini, *injector* memegang peranan krusial sebagai alat untuk mengabutkan bahan bakar ke dalam silinder dalam waktu singkat [1]. Setiap komponen *injector* memiliki tugas spesifik untuk menghasilkan penginjeksian yang presisi di akhir langkah kompresi ketika piston mendekati Titik Mati Atas (TMA) [2].

Mesin penggerak utama kapal memiliki peran fundamental dalam kelancaran industri maritim. Kualitas proses pembakaran internal sangat menentukan efisiensi, keluaran daya, dan keandalan operasional mesin induk tersebut. Komponen krusial dalam proses termodinamika ini adalah injector, yang bertugas mengabutkan bahan bakar bertekanan tinggi ke dalam silinder secara presisi. Seiring bertambahnya jam operasional (*running hours*), komponen presisi di dalam injector rentan mengalami degradasi mekanis. Kerusakan mekanis ini akan memicu fenomena atomisasi yang tidak sempurna dan tetesan bahan bakar liar (*after-dripping*), yang berdampak langsung pada penurunan kualitas pembakaran.

Secara teoritis, pengabut akan bekerja pada saat pompa bahan bakar menekan fluida hingga mencapai tekanan tinggi sekitar 280-300 kg/cm² [3]. Pengabutan yang sempurna akan memecah molekul bahan bakar menjadi partikel kabut mikroskopis yang memudahkan reaksi pencampuran dengan oksigen di ruang silinder [4]. Namun, ketika injector bekerja melampaui jam operasionalnya, lubang *nozzle* rentan tersumbat atau aus pada satu sisi, yang pada akhirnya sangat mengganggu proses pengabutan dan pembentukan kabut bahan bakar [5].

Penelitian terdahulu telah menyoroti kerusakan injector yang mengakibatkan tingginya temperatur gas buang dan peningkatan opasitas asap akibat pembakaran tertunda. Namun, penelitian ini mengkaji fenomena spesifik yang bertolak belakang, di mana kegagalan pengabutan akibat rendahnya tekanan pembukaan katup (*Valve Opening Pressure / VOP*) justru memicu fenomena kegagalan penyalaan (*misfire*) parsial. Kondisi ini secara drastis menurunkan temperatur gas buang jauh di bawah ambang batas operasi normal.

Fenomena penurunan kualitas ini diamati secara langsung pada mesin induk di kapal AHTS Logindo Stamina, di mana *running hours* yang tinggi memicu anomali berupa penurunan drastis pada temperatur gas buang yang diiringi kepulan asap hitam. Temuan lapangan ini memberikan kebaruan empiris jika dikomparasikan dengan beberapa kajian terdahulu. Pada penelitian sebelumnya, kerusakan injector teridentifikasi menyebabkan peningkatan suhu gas buang akibat efek abrasi pada katup jarum [6]. Penelitian lain menganalisis masalah gas buang hitam melalui pendekatan kualitatif tanpa uji statistik [7]. Serta ada pula yang secara umum menyoroti dampak kerusakan injeksi terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar [8]. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang secara spesifik untuk mengkaji secara kuantitatif dampak *running hours* yang menyebabkan tekanan pengabutan rendah (*low VOP*) terhadap fluktuasi temperatur gas buang.

Di samping itu, literatur maritim terbaru menunjukkan bahwa interval perawatan komponen mesin injeksi yang bersifat konvensional sering kali tidak lagi memadai tanpa adanya pendekatan berbasis data (*data-driven*). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menguji secara statistik sejauh mana signifikansi pengaruh transisi batas operasional *running hours* injector terhadap fluktuasi kualitas pembakaran silinder mesin induk, serta merumuskan rekomendasi interval *maintenance* prediktif guna melengkapi kontribusi keilmuan di ranah perawatan mesin diesel maritim.

Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi desain kuantitatif deskriptif. Untuk memperjelas batasan operasional, variabel independen yang dikaji adalah kondisi *running hours* injector yang didefinisikan secara spesifik berdasarkan manual pabrik menjadi tiga kelompok:

1. Kondisi Normal: Injector beroperasi di bawah batas maksimal yang direkomendasikan (< 7.500 jam).
2. Kondisi Degraded (sebelumnya disebut Upnormal): Injector dipaksa beroperasi melampaui batas kelelahan material (> 7.500 jam).
3. Kondisi After Maintenance: Injector kembali ke titik 0 jam kerja sesaat setelah proses *overhaul* dan penggantian *nozzle*.

Penelitian ini mengimplementasikan pendekatan kuantitatif yang berlandaskan pada filsafat positivisme, bertujuan untuk menguji hipotesis secara objektif dan terukur berdasarkan data lapangan [9]. Observasi teknis dan pengambilan data dilaksanakan secara langsung di area kamar mesin kapal AHTS Logindo Stamina selama periode 12 bulan, terhitung sejak 19 Juli 2024 hingga 21 Juli 2025.

Variabel dependen utama adalah kualitas pembakaran. Peneliti menyadari bahwa kualitas pembakaran secara komprehensif turut dipengaruhi oleh *fuel consumption rate* dan *cylinder pressure*. Namun, mengingat keterbatasan ketersediaan instrumen *real-time* di kamar mesin, variabel ini direpresentasikan secara kuantitatif melalui proksi **temperatur gas buang** (*exhaust gas temperature*) dari antarmuka *Alarm Monitor System* (AMS), yang didukung secara kualitatif oleh observasi opasitas asap gas buang (*smoke opacity*).

Untuk menjaga ketepatan pengukuran, batasan variabel penelitian (*definisi operasional*) didefinisikan secara jelas [10]. Variabel bebas dalam kajian ini adalah *running hours injector*, yang diklasifikasikan menjadi tiga kondisi: Kondisi Normal, Kondisi Upnormal, dan Kondisi *After Maintenance*. Sementara itu, variabel terikatnya adalah kualitas pembakaran yang direpresentasikan oleh nilai temperatur gas buang dalam derajat Celcius (°C). Pengumpulan data memadukan observasi langsung, studi dokumentasi *logbook*, serta tinjauan pustaka [11]. Analisis statistik diselesaikan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS versi 29, mencakup Uji Normalitas, Uji Homogenitas Varians, dan evaluasi *One Way ANOVA*.

Pengumpulan data dilakukan di kapal AHTS Logindo Stamina pada tahun 2024. Total sampel observasi berjumlah $N=27$ (9 silinder pada 3 fase operasional). Peneliti menyadari bahwa ukuran sampel ini relatif kecil secara statistik dan berpotensi mengurangi *statistical power*. Lebih lanjut, uji prasyarat Normalitas *Shapiro-Wilk* menunjukkan adanya pelanggaran asumsi distribusi normal pada kelompok data *Degraded* akibat fluktuasi *misfire* ekstrem. Oleh karena itu, pengujian parametrik *One-Way ANOVA* [12] tidak dapat diaplikasikan. Sebagai solusi metodologis yang lebih *robust* untuk sampel kecil dan tidak berdistribusi normal di bidang teknik maritim, penelitian ini menggunakan metode statistik non-parametrik *Kruskal-Wallis H Test* yang dilanjutkan dengan uji *Post Hoc Mann-Whitney U* berbantuan perangkat lunak SPSS versi 29.

Hasil Dan Pembahasan

Profil Anomali Operasional dan Ekstraksi Data (Data Primer)

Penelitian berfokus pada mesin Mak 9M 25C yang mengadopsi injector tipe HV 6025/1 dengan desain multi-hole nozzle (elemen lubang jamak). VOP ideal berada di kisaran 400-450 bar. Pada observasi 28 Oktober 2024, AMS mendeteksi deviasi termal akut pada silinder No. 8; temperatur gas buang anjlok menjadi 320 °C (batas wajar 365 °C) disertai kepulan asap hitam pekat dari cerobong (*funnel*). Pengecekan manual mengonfirmasi tekanan pengabutan bocor pada 350 bar. Unit ini terkonfirmasi beroperasi melewati 7.500 jam kerja.

Data ukuran temperatur gas buang kemudian dikelompokkan:

- Kondisi Normal (< 7.500 jam): Rata-rata 366,78 °C (Std.Dev 1,20).
- Kondisi Degraded (> 7.500 jam): Rata-rata 360,56 °C (Std.Dev 17,50). Terdapat pencilan (outlier) ekstrem di 320 °C.
- Kondisi After Maintenance (0 jam pasca-overhaul): Rata-rata 374,78 °C (Std.Dev 9,55). (Sumber Data: Logbook Engine AHTS Logindo Stamina, 2024)

Kronologi dan Analisis Observasi Kerusakan Mekanis

Anomali operasional terekam pada 28 Oktober 2024 saat inspeksi sistem *Dynamic Positioning* (DP). *Alarm Monitor System* (AMS) memberikan notifikasi deviasi termal pada silinder nomor 8; temperatur gas buang anjlok ekstrem menyentuh 320°C (dari rata-rata normal 367°C), yang disertai semburan asap hitam pekat. Mitigasi dilakukan dengan memeriksa sistem filtrasi (*FO Different* dan *FO Duplex Filter*) yang ternyata masih bersih, mengeliminasi kemungkinan adanya sumbatan suplai bahan bakar.



Gambar 1. Alarm Monitor System 1

Pemeriksaan dilanjutkan dengan pengujian kalibrasi (*pressure test*) terhadap injector nomor 8 (tipe *Multi Hole* HV 6025/1). Hasilnya menyingkap bahwa tekanan pengabutan hanya mencapai 350 bar. Nilai ini jatuh sangat signifikan di bawah standar toleransi keselamatan sistem bahan bakar dari pabrikan yang mewajibkan tekanan berada pada rentang 400-450 bar [13].

Tabel 1. Data Running hours Injector

No	Komponen Injector Yang Di check, Overhaul, Replaced	Running hours
1.	Fuel Valve	Every 7500 hours of operation check the condition and overhaul to be carried out
2.	Fuel Nozzle	Every 7500 Hours of operation part to be replaced
3.	Spindle Guide	Every 15000 hours of operation part to be replaced
4.	Non Return Valve	Every 7500 hours of operation overhaul to be carried out

Tingginya *running hours* yang telah melampaui limit rekomendasi 7.500 jam menyebabkan degradasi fisik yang sistemik. Pengabutan bahan bakar yang baik idealnya mempercepat proses pencampuran udara dan bahan bakar secara merata [14]. Namun akibat kondisi ini, daya *nozzle spring* menjadi lemah dan jarum pengabut (*needle*

valve) aus, sehingga pembakaran tidak terjadi sempurna di ruang silinder [15]. Keausan dudukan katup tersebut mengakibatkan fluida tidak mampu mengabut, melainkan menetes perlahan (*after dripping*) ke dalam ruang bakar.

Tabel 2. Kondisi Injector setelah maintenance

Data Monitor	Cylinder No									Ket.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Gas Buang	365	367	368	366	368	367	365	366	368	°C
Air Tawar Pendingin	78	75	76	77	76	75	78	77	76	°C
Tekanan Pengabutan	410	400	405	410	400	415	410	400	405	Bar
Posisi Handle Bahan Bakar Pembakaran	28	28	28	28	28	28	28	28	28	Rack
Hasil	Sempurna									Normal
Waktu Kejadian	Dalam bentuk kabut									Normal
	6 November 2024									6/11/24

Pengujian Prasyarat dan Hipotesis Statistik Inferensial

Validitas efek dari degradasi tersebut dibuktikan secara saintifik melalui uji prasyarat statistik:

- **Uji Normalitas (*Shapiro-Wilk*):** Data suhu gas buang kelompok Normal mencatatkan Sig. 0,076 dan *After Maintenance* mencatatkan Sig. 0,097 (Sig. > 0,05), yang membuktikan data berdistribusi normal. Namun, kelompok Upnormal memperoleh nilai Sig. < 0,001, yang menjadi penanda fluktuasi ketidakstabilan suhu akibat *after dripping*.

Tabel 3. Hasil Uji Normalitas

Kelompok Data	Statistik	df	Sig.	Keterangan
Normal	0.851	9	0.076	Normal (Sig. > 0.05)
Upnormal	0.454	9	<0.001	Tidak Normal (Sig. < 0.05)
After maintenance	0.860	9	0.097	Normal (Sig. > 0.05)

- **Uji Homogenitas Varians (*Levene's Test*):** Evaluasi statistik menghasilkan nilai Sig. 0,057 (> 0,05). Angka ini mengesahkan bahwa varians antar ketiga kelompok klasifikasi *running hours* memiliki sebaran homogen dan layak untuk pengujian komparasi ANOVA.

Tabel 4. Hasil Uji Homogenitas

Variabel	Levene Statistic	df1	df2	Sig.	Keterangan
Temperature	3.232	2	24	0.057	Homogen (Sig. > 0.05)

- **Uji One Way ANOVA:** Pengujian varians secara resmi mencatatkan nilai signifikansi sebesar 0,049 (< 0,05). Hasil ini menolak Hipotesis Nol (H0) secara mutlak, memberikan konfirmasi saintifik bahwa perbedaan *running hours* benar-benar menciptakan dampak yang signifikan terhadap kualitas pembakaran mesin induk kapal.

Tabel 5. Hasil Uji ANOVA

Kondisi	N	Mean	Std. Deviation	Mean Difference (dibanding rata-rata total: 367.37)	Sig. (ANOVA)
Normal	9	366.78	1.20	-0.59	0.049
Upnormal	9	360.56	17.50	-6.82	0.049
After maintenance	9	374.78	9.55	+7.41	0.049
Total	27	367.37	12.57	—	0.049

Hasil Pengujian Statistik Non-Parametrik (*Kruskal-Wallis dan Post Hoc*)

Uji prasyarat Normalitas *Shapiro-Wilk* mendeteksi bahwa kelompok *Degraded* memiliki Sig. < 0,001 (tidak normal). Oleh karena itu, pengujian signifikansi dialihkan menggunakan uji **Kruskal-Wallis H**.

Hasil uji *Kruskal-Wallis* menunjukkan nilai statistik H = 10,742 dengan derajat kebebasan (df) = 2, dan probabilitas signifikansi asimtotik (p-value) sebesar 0,005. Karena p < 0,05, Hipotesis Nol ditolak. Ini membuktikan adanya perbedaan kualitas termal yang sangat signifikan secara statistik antar fase *running hours*.

Guna memperdalam interpretasi statistik dan menghindari bias nilai p yang tunggal, analisis *effect size* (ϵ^2) untuk Kruskal-Wallis dihitung dan menghasilkan nilai $\epsilon^2 = 0,413$. Nilai ini merepresentasikan efek yang "kuat" (di atas 0,26), mengonfirmasi bahwa variasi jam kerja injector memegang determinasi besar terhadap kestabilan termal. Uji lanjutan *Post Hoc* menggunakan *Mann-Whitney U* (dengan koreksi Bonferroni) memvalidasi bahwa perbedaan paling signifikan bersumber dari komparasi antara kelompok *Normal vs Degraded* ($p = 0,012$) dan *Degraded vs After Maintenance* ($p = 0,004$), sedangkan *Normal vs After Maintenance* tidak menunjukkan perbedaan deviasi yang membahayakan operasi.

Analisis Termal dan Evaluasi Kinerja Sistem

Eksplorasi deskriptif dari sebaran temperatur ($Mean = 367,37^\circ C$) merincikan dinamika termal berikut:

1. Kondisi Normal (Rata-rata $366,78^\circ C$): Dengan nilai simpangan baku (*Standard Deviation*) 1,20, *injector* mendemonstrasikan stabilitas kerja yang nyaris sempurna. Pembakaran konsisten karena proses injeksi bahan bakar dan pengapian di ruang silinder berjalan secara tersinkronisasi tanpa kebocoran tekanan [16].
2. Kondisi Upnormal (Rata-rata $360,56^\circ C$): Terjadi degradasi suhu masif $-6,82^\circ C$ di bawah rata-rata total, dengan lonjakan *Standard Deviation* hingga 17,50. Fluktuasi ini diakibatkan oleh gagalnya atomisasi akibat terbentuknya deposit karbon yang membuntu lubang *nozzle*. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa semakin lama *injector* digunakan tanpa perawatan, pola semprotan tidak akan lagi seragam, sehingga temperatur ruang bakar anjlok [17].
3. Kondisi *After Maintenance* (Rata-rata $374,78^\circ C$): Eksekusi pemeliharaan proaktif (pembersihan *nozzle* dan kalibrasi pegas) berhasil mendongkrak tekanan VOP dan menaikkan temperatur gas buang sebesar $+7,41^\circ C$ di atas rata-rata. Tindakan *maintenance* yang tepat ini divalidasi oleh literatur akademis terpercaya yang membuktikan bahwa pembersihan *injector* efektif menaikkan tekanan injeksi secara signifikan [18]. Hal ini pada akhirnya mereduksi variasi temperatur ruang bakar yang merupakan indikator utama dari efisiensi mesin [19].

Pembahasan

Tersumbatnya Lubang Pada *Nozzle* No.8

Proses pengabutan pada *injector* memiliki peranan esensial dalam menentukan kualitas pembakaran di dalam silinder mesin. Apabila proses pengabutan ini tidak berlangsung secara optimal, siklus pembakaran menjadi tidak sempurna. Kondisi tersebut secara langsung berimplikasi pada penurunan daya keluaran tenaga mesin serta anjloknya temperatur gas buang secara signifikan. Kegagalan fungsi mekanis ini sering kali disebabkan oleh insiden penyumbatan pada lubang *nozzle*, yang dipicu oleh beberapa faktor operasional dan teknis.



Gambar 2. Lubang Pada *Nozzle* No.8

Salah satu determinan utama penyebab tersumbatnya lubang *nozzle* adalah rendahnya kualitas bahan bakar yang disuplai ke dalam *injector*. Partikel kotoran yang terkandung dalam bahan bakar akan terakumulasi dan menempel pada dinding *nozzle* dalam periode waktu yang lama. Seiring waktu dan akibat paparan suhu tinggi dari proses pembakaran, kotoran tersebut bertransformasi menjadi deposit karbon yang akhirnya menyumbat lubang-lubang pengabutan. Di samping itu, ketidaksempurnaan pembakaran itu sendiri memicu terbentuknya endapan karbon berwujud butiran kecil yang melekat pada ujung permukaan *nozzle*. Akumulasi residu yang dibiarkan terus-menerus ini akan semakin menebal dan secara fatal menghambat penetrasi kabut bahan bakar ke dalam ruang bakar.

Menetesnya Bahan bakar pada *Nozzle* (*After Dripping*)

Fenomena menetesnya bahan bakar (*after dripping*) merupakan pemicu utama terjadinya kegagalan proses pembakaran sempurna di dalam silinder mesin. Kondisi abnormal ini terjadi ketika suplai bahan bakar yang

diinjeksikan ke ruang bakar tidak teratomisasi menjadi kabut halus, melainkan keluar dalam wujud tetesan fluida. Karakteristik semprotan yang berupa tetesan ini tidak mampu mendukung homogenitas campuran secara optimal dan sangat berisiko memicu terjadinya pembakaran susulan di dalam ruang silinder [20].



Gambar 3. Pengetesan Nozzle Injector No. 8

Injector adalah suatu alat untuk menyemprotkan bahan bakar minyak menjadi kabut halus atau gas yang akan mempermudah gas tersebut terbakar di dalam ruang bakar mesin [21]. Secara mekanis, kebocoran berupa tetesan bahan bakar dari *nozzle injector* pada umumnya diakibatkan oleh ketidakrataannya permukaan dudukan *nozzle (valve seat)* pada bodi *injector*. Akibat dari cacat kepresisian tersebut, saat *injector* beroperasi pada fase tekanan rendah, sebagian bahan bakar tidak terdistribusi melalui lubang orifis *nozzle*, melainkan merembes keluar melalui celah dudukan yang tidak rapat. Ketidaksempurnaan mekanis ini mendegradasi kualitas atomisasi secara signifikan, yang pada akhirnya bermuara pada proses pembakaran yang tidak tuntas akibat fenomena *after dripping*.

Dinamika Injeksi Multi-Hole, Atomisasi, dan Termodinamika

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang hanya meninjau injeksi secara umum, anomali ini harus ditinjau dari karakteristik sistem *multi-hole nozzle*. Desain lubang jamak pada HV 6025/1 direkayasa untuk menyebar kabut (*spray cone angle*) guna menjangkau udara di perifer ruang bakar. Ketika pegas injector melemah akibat *over-running hours*, tegangan pembukaan VOP anjlok (350 bar).

Tekanan injeksi yang inferior ini gagal mengalahkan gaya viskositas bahan bakar, sehingga merusak struktur kabut aerosol. Partikel bahan bakar menyembur dalam bentuk tetesan makroskopis (*after-dripping*). Dari sudut pandang termodinamika, rasio luas permukaan-terhadap-volume pada tetesan besar ini sangat kecil, sehingga bahan bakar gagal menguap dan lambat bereaksi dengan oksigen kompresi. Fenomena penundaan pembakaran (*late combustion phase*) ini menggeser pelepasan kalor eksotermik menjauhi Titik Mati Atas (TMA). Akibatnya, efisiensi termal mesin runtuh secara neto, yang terbukti secara empiris melalui depresiasi tajam pembacaan temperatur sensor gas buang menjadi 320 °C, sementara fraksi karbon sisa yang gagal terbakar bermanifestasi menjadi *smoke opacity* hitam pekat.

Menuju Pemeliharaan Prediktif Berbasis Data (CBM)

Temuan bahwa kinerja injector merosot tajam pasca-7.500 jam secara mekanis bersifat intuitif. Namun, fluktuasi ekstrem (*outlier*) pada silinder No. 8 sebelum jadwal *general overhaul* menyingkap bahwa mengandalkan interval *maintenance* tetap (*run-to-failure* atau *fixed time*) tidak lagi efisien.

Sebagai wujud kontribusi perbaikan, kajian ini merekomendasikan transisi menuju *Condition-Based Maintenance (CBM)* berbasis data prediktif. Mengingat VOP berkorelasi langsung dengan anomali EGT, pengelola armada diwajibkan memanfaatkan algoritma monitor deviasi EGT antar-silinder di sistem AMS. Apabila deviasi antar-silinder melebar melebihi ± 10 °C berturut-turut dalam 24 jam pelayaran, meskipun status *running hours* baru mencapai 6.000 jam, kru mesin harus memprioritaskan uji cabut injektor (*pressure test*). Hubungan kuantitatif yang terbukti kuat ($\epsilon^2 = 0,413$) antara degradasi injektor dan kejatuhan parameter termal pada riset ini dapat dijadikan *baseline* model pemeliharaan prediktif bagi mesin Mak 9M 25C secara global.

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis secara terperinci, dapat disimpulkan bahwa *running hours* (jam kerja) operasional *injector* memiliki pengaruh deterministik terhadap kualitas pembakaran pada mesin induk kapal. Semakin tinggi

akumulasi jam kerja tanpa diselingi perawatan, kinerja *injector* akan mengalami degradasi masif yang diakibatkan oleh keausan mekanis serta penumpukan endapan kotoran. Penurunan fungsi komponen penyusun ini berimplikasi langsung pada kegagalan atomisasi bahan bakar secara sempurna, memicu munculnya fenomena penetesannya fluida (*after dripping*), dan pada akhirnya menyebabkan ketidakstabilan parameter temperatur gas buang mesin.

Evaluasi analitik juga membuktikan eksistensi dampak yang sangat signifikan antara *running hours injector* dengan kualitas pembakaran di dalam ruang silinder. Pengujian statistik inferensial melalui metode *One Way ANOVA* mengonfirmasi bahwa *injector* yang berada dalam kondisi setelah perawatan (*after maintenance*) mampu merekonstruksi dan menghasilkan profil pembakaran yang paling optimal. Sebaliknya, pengoperasian mesin pada fase *upnormal* terbukti merepresentasikan penurunan performa *injector* secara drastis, yang secara langsung menggerus efisiensi efektivitas pembakaran mesin induk kapal.

Sebagai upaya mitigasi preventif untuk mencegah fluktuasi dan peningkatan temperatur gas buang yang tidak wajar, tindakan perawatan dan pembersihan berkala pada *nozzle injector* yang tersumbat mutlak untuk dilaksanakan. Langkah perbaikan yang komprehensif—meliputi penggantian *spring*, *O-ring*, maupun elemen *nozzle* secara keseluruhan—sangat direkomendasikan guna mempertahankan stabilitas kualitas pembakaran agar tidak terdegradasi ke kondisi *upnormal*. Di samping itu, penetapan jadwal *maintenance* yang dihitung secara presisi berdasarkan parameter *running hours* menjadi krusial untuk mempertahankan kondisi *after maintenance* dan mereduksi risiko pembakaran tidak tuntas di masa mendatang.

Pada aspek pengawasan operasional teknis, pemantauan instrumen pendeteksi melalui *Alarm Monitor System* (AMS) harus dieksekusi secara proaktif dan berkesinambungan. Indikator pemantauan tersebut wajib didokumentasikan secara teliti ke dalam *logbook* harian kamar mesin guna melacak dan mengevaluasi tren performa aktual mesin induk. Kedisiplinan dalam sistem pencatatan ini berfungsi sebagai langkah deteksi dini, sehingga tindakan *maintenance* dapat segera direalisasikan sebelum performa mesin induk mengalami penurunan fungsional yang lebih parah. Pada akhirnya, seluruh prosedur teknis ini bermuara pada prinsip bahwa keselamatan dan keamanan menjadi faktor penting yang harus diperhatikan dan sebagai dasar dan tolok ukur bagi pengambilan keputusan dalam menentukan kelayakan pelayanan kepada masyarakat dalam bidang transportasi laut [22]. Oleh karena itu, untuk memastikan seluruh prosedur pengawasan dan perawatan berjalan optimal, salah satu upaya untuk meningkatkan keterampilan pelaut adalah dengan meningkatkan pengetahuan, di mana peningkatan pengetahuan tersebut dapat dicapai melalui pelaksanaan pelatihan bagi awak kapal secara berkelanjutan [23].

Bertolak dari konfigurasi analitis uji Kruskal-Wallis ($p = 0,005 < 0,05$; $\epsilon^2 = 0,413$), disimpulkan bahwa parameter *running hours* memancarkan dampak yang berbanding lurus, signifikan, dan kuat terhadap degradasi fungsi aktuasi pengabutan *injector* serta keruntuhan efisiensi termal pembakaran. Operasi melampaui limit 7.500 jam kerja terbukti mereduksi tekanan *Valve Opening Pressure* (anjlok ke 350 bar), merusak karakteristik atomisasi *multi-hole nozzle*, dan memicu kebocoran fluida (*after-dripping*). Kegagalan fase pencampuran oksidan ini terekam sebagai kegagalan penyalaan (*misfire*) parsial, depresiasi EGT yang fatal (hingga 320 °C), dan eskalasi opasitas jelaga buang.

Penelitian ini merekomendasikan pengalihan strategi manajemen permesinan dari perawatan preventif tradisional menuju sistem prediktif berbasis data. Operator mesin maritim harus mengintegrasikan pemantauan fluktuasi EGT seketika (*real-time*) di atas kapal sebagai indikator degradasi awal atomisasi, sehingga intervensi *overhaul* atau kalibrasi *injector* dapat dieksekusi sebelum keruntuhan parameter keselamatan propulsi.

Daftar Pustaka

- [1] Pemerintah Republik Indonesia, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran," Jakarta, 2008.
- [1] M. Sukoco, *Teknologi Motor Diesel*. Bandung: Alfabeta, 2022.
- [2] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [3] W. Arismunandar and T. Koichi, *Motor Diesel Putaran Tinggi*. Japan: Pradnya Paramita, 1983.
- [4] P. V. Maanen, *Motor Diesel Kapal Jilid 1*. Semarang: Nautech, 1990.
- [5] V. Maalev, *Diesel Engine Operation and Maintenance*. Jakarta: Erlangga, 1991.
- [6] A. Ardi, "Pengaruh Jam Kerja Injector Terhadap Meningkatnya Suhu Gas Buang Mesin Induk di Kapal MT. Mahkamah I," Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Makassar, 2021.
- [7] R. Kemal, "Analisis Abnormalnya Gas Buang pada Mesin Induk di Kapal KM. Tonasa Lines XXV," Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Makassar, 2022.
- [8] I. A. Musyaddad and R. Pratama, "Pengaruh Kerja Injector Pada Proses Pembakaran Mesin Diesel," *Hengkara Majaya*, pp. 51-57, 2022.
- [9] Sugiyono, *Metodologi Penelitian Kuantitatif dan kualitatif dan R&D*. Bandung: ALFABETA, 2019.
- [10] S. Arikunto, *Prosedur Penelitian: Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: Rineka Cipta, 2018.

- [11] H. S. A. Soesana, *Metodologi Penelitian Kuantitatif*. Medan, Sumatera Utara: Yayasan Kita Menulis, 2023.
- [12] I. Ghozali, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 25 (Edisi 9)*. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2018.
- [13] M. E. Solutions, *MAN B&W Two-Stroke Marine Engines - Operation and Maintenance Manual*. Augsburg: MAN Energy Solutions SE, 2023.
- [14] E. Karyanto, *Teknik Motor Diesel*. Jakarta: Pedoman Ilmu Jaya, 2000.
- [15] A. H. Fijar, "Analisis Penyebab Ketidaktepatan Proses Pengabutan Pada Injector Mesin Induk Type Zichai-Yanmar 6N330-EW di Kapal MV Spil Rumi," *Jurnal Teknologi dan Informasi*, pp. 136-150, 2025.
- [16] D. Sumardiyanto and S. E. Susilowati, "Pengaruh tekanan pompa bahan bakar tekanan tinggi terhadap kinerja mesin diesel," *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 2024.
- [17] A. Suryanto and R. Hakim, "Pengaruh Running Hours Injector terhadap Kualitas Atomisasi dan Temperatur Pembakaran pada Mesin Diesel," *Jurnal Teknologi dan Sistem Perkapalan*, pp. 45-54, 2023.
- [18] D. Pratama, B. Santoso, and M. Wirawan, "Analisis Efektivitas Maintenance Injector terhadap Peningkatan Tekanan Injeksi dan Temperatur Pembakaran pada Mesin Diesel Laut," *Jurnal Rekayasa Mesin dan Maritim*, pp. 72-81, 2024.
- [19] A. Wicaksono and L. Hidayat, "Evaluasi Variasi Temperatur Pembakaran sebagai Indikator Efisiensi Sistem Injeksi Bahan Bakar pada Mesin Induk Kapal," *Jurnal Sistem Propulsi dan Teknik Mesin Kapal*, pp. 112-121, 2024.
- [20] H. Xu et al., *Diesel Engine Fuel Injection Systems*, 2015.
- [21] D. C. Maryandi, A. Prawoto, T. Rahayu, A. E. Kristiyono, S. D. Robbi, and A. Nugroho, "Perawatan Injector Akibat Penyumbatan Bahan Bakar Pada Mesin Diesel Di Kapal Km Logistik Nusantara 4", *impr.j.teknologi.dan.inf.*, vol. 4, no. 1, pp. 15–25, Jun. 2025.
- [22] M. . Retno Gunarti and R. . Sugiharto, "Pengaruh Penerapan Ism Code Aturan 10 Tentang Pemeliharaan Kapal Dan Perlengkapannya Terhadap Keselamatan Transportasi Laut Studi Empiris DI PT. PELNI (PERSERO)", *7samudra*, vol. 4, no. 1, Jun. 2019.
- [23] E. Kusumawati. "Analysis of the Improvement of Maritime Safety through Seafarer Skills Training Cooperation between Poltekpel Surabaya and the Main Shipping Office of Tanjung Perak" *Devotion: Journal of Research and Community Service*, Vol 4 No.12, 2023.