

**PENGARUH TERSUMBATNYA KATUP ELFI (ELECTRONIC
FUEL INJECTION VALVE) TERHADAP STABILITAS
ALIRAN BAHAN BAKAR PADA MESIN INDUK DIATAS
KAPAL MV.GREAT HAN**



Disusun sebagai salah satu syarat penyelesaian Program
Pendidikan Dan Pelatihan Pelaut (DP) Tingkat I

MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR

NIS: 25.05.102.022

AHLI TEKNIK TINGKAT I

**PROGRAM DIKLAT PELAUT TINGKAT I
POLITEKNIK ILMU PELAYARAN MAKASAR**

2025

PERYATAAN KEASLIAN

Yang Bertanda Tangan Dibawah Ini :

Nama : MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR

Nomor Induk Siswa : 25.05.102.022

Program Pelatihan : Ahli TeknikTingkat I

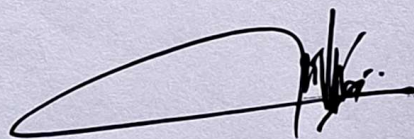
Menyatakan bahwa KIT yang saya tulis dengan judul:

**PENGARUH TERSUMBATNYA KATUP ELFI (ELECTRONIC
INJECTION VALVE) TERHADAP STABILITAS ALIRAN BAHAN
BAKAR PADA MESIN INDUK DIATAS KAPAL MV.GREAT HAN**

Merupakan karya asli. Seluruh ide yang ada dalam KIT tersebut, kecuali tema dan yang saya nyatakan sebagai kutipan, merupakan ide sendiri.

Jika pernyataan di atas terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi yang ditetapkan oleh Politeknik Pelayaran Makassar

Makassar, 5- 8- 2025



MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR

PERSETUJUAN SEMINAR KARYA ILMIAH TERAPAN

Judul : PENGARUH TERSUMBATNYA KATUP ELFI
(ELECTRONIC FUEL INJECTION VALVE)
TERHADAP STABILITAS ALIRAN BAHAN
BAKAR PADA MESIN INDUK DIATAS KAPAL
MV.GREAT HAN

NAMA PASIS : MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR

NOMOR INDUK SISWA : 25.05.102.022

PROGRAM DIKLAT : AHLI TEKNIK TINGKAT I

Dengan ini dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diseminarkan.

Makassar, 4-8-2025

Menyetujui:

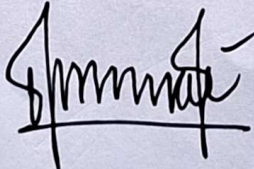
Pembimbing I

Pembimbing II


Ir.H MAHBUB ARFA, S.Si.T, M.T., M.Mar.E
NIP. 19780502200121001


SYAMSU ALAM ST., M.M., M.Mar.E
NIP.

Mengetahui:
Manager Diklat Teknis
Peningkatan dan Penjenjangan


Ir. SUYUTI, M.Si., M.Mar.E
NIP. 196805082002121002

**PENGARUH TERSUMBATNYA KATUP ELFI (ELECTRONIC FUEL
INJECTION VALVE) TERHADAP STABILITAS ALIRAN BAHAN
BAKAR PADA MESIN INDUK DIATAS KAPAL MV.GREAT HAN**

Disusun dan Diajukan Oleh:

MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR
25.05.102.022
AHLI TEKNIK TINGKAT I

Telah di pertahankan di depan panitia Ujian KIT
Pada tanggal, 8 - 8 - 2025

Pembimbing I
Menyetujui:
Pembimbing II


R.H MAHBUB ARFA, S.Si.T.MT., M.Mar.E
NIP. 1 19780502200121001


SYAMSU ALAM, ST., M.M., M.Mar.E
NIP.

Mengetahui:

A.n. Direktur
Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
Pembantu Direktur I


Capt. FAISAL SARANSI, MT., M.Mar
NIP. 197503291999031002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia-Nya yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan KIT ini. Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan bagi Perwira Siswa Jurusan Ahli Teknik Tingkat I (ATT I) dalam menyelesaikan studinya pada program ATT I di Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar. Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan baik dari segi tata bahasa, struktur kalimat, maupun metode penulisan.

Tak lupa pada penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Capt. Rudy Susanto, M.Pd. selaku Direktur Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
2. Ir. Suyuti, M.Si., M.Mar.E. selaku Manager Diklat Teknis Peningkatan dan Penjenjangan Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
3. Ir.H Mahbub Arfa, S.Si.T, MT., M.Mar.E selaku pembimbing I penulisan KIT Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
4. Syamsu Alam, ST., M.M., M.Mar.E. selaku pembimbing II penulisan KIT Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
5. Seluruh Staf Pengajar Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar atas bimbingan

yang diberikan kepada penulis selama mengikuti program diklat ahli Teknik tingkat I (I) di PIP Makassar.

6. Rekan-rekan Pasis Angkatan XLV Tahun 2025

7. Kedua orang tuaku tercinta, Bapak, Ibu, dan Istriku tercinta yang telah memberikan doa, dorongan, serta bantuan moril dan materil sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan KIT ini.

Dalam penulisan KIT ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan- kekurangan dipandang dari segala sisi. Tentunya dalam hal ini tidak lepas dari kemungkinan adanya kalimat-kalimat atau kata-kata yang kurang berkenan dan perlu untuk diperhatikan. Namun walaupun demikian, dengan segala kerendahan hati penulis memohon kritik dan saran-saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan makalah ini. Harapan penulis semoga karya tulis ilmiah terapan ini dapat dijadikan bahan masukan serta dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

Makassar, 5-8-2025



MIKRAD PETA PRATIWI
TAHIR

ABSTRAK

MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR ,2025 PENGARUH KONDISI KATUP ELFI (ELECTRONIC *FUEL INJECTION* VALVE) TERHADAP STABILITAS ALIRAN BAHAN BAKAR PADA MESIN INDUK DIATAS KAPAL MV.GREAT HAN DI BIMBING OLEH MAHBUB ARFA DAN SYAMSU ALAM

Penelitian ini mengkaji masalah kerusakan katup *Electronic Fuel Injection* (ELFI) di mesin induk kapal MV. Great Han yang terjadi selama pelayaran dari Livorno, Italia, menuju Santos, Brasil pada 18 Oktober 2024. Masalah utama yang diteliti adalah penyumbatan katup ELFI silinder nomor 4 akibat kontaminasi bahan bakar, yang menyebabkan ketidakstabilan tekanan bahan bakar, pembakaran tidak sempurna, dan akhirnya shutdown darurat mesin. Penelitian dilakukan melalui analisis langsung di atas kapal, meliputi pemeriksaan endapan karbon, pengukuran *parameter* operasional mesin, evaluasi sistem filtrasi bahan bakar, dan pengecekan kualitas bahan bakar yang digunakan.

Hasil penelitian mengungkapkan tiga akar masalah utama: pertama, kontaminasi bahan bakar oleh partikel logam mikro (20-50 mikron) dan senyawa karbon yang menyumbat *nozzle injektor*; kedua, kegagalan sistem filtrasi dengan kondisi filter primary dan secondary yang sudah melebihi masa pakai; dan ketiga, ketidaksesuaian kualitas bahan bakar terhadap standar ISO 8217, terutama pada kandungan air (0.3% volume) dan mikroorganisme (10^4 CFU/ml). Analisis lebih lanjut menunjukkan ketiadaan pemantauan rutin kualitas bahan bakar dan interval perawatan katup ELFI yang tidak terpenuhi sesuai manual mesin. Dampak operasional yang terjadi meliputi penurunan performa mesin, getaran abnormal, dan terpaksa dilakukan perbaikan darurat di tengah pelayaran yang mengganggu jadwal operasional kapal.

Kata Kunci: Katup ELFI , kontaminasi bahan bakar, sistem filtrasi, perawatan mesin, kualitas bahan bakar

ABSTRACT

MIKRAD PETA PRATIWI TAHIR, 2025 THE EFFECT OF ELECTRONIC *FUEL INJECTION* VALVE CONDITIONS ON FUEL *FLOW* STABILITY IN THE MAIN ENGINE ON THE MV. GREAT HAN, SUPERVISED BY MAHBUB ARFA AND SYAMSU ALAM

This study examines the Electronic *Fuel Injection* (ELFI) valve failure in the main engine of the MV. Great Han, which occurred during a voyage from Livorno, Italy, to Santos, Brazil on October 18, 2024. The primary problem investigated was a blockage of the ELFI valve in cylinder number 4 due to fuel contamination, which caused fuel pressure instability, incomplete combustion, and ultimately an emergency engine shutdown. The study was conducted through on-board analysis, including carbon deposits, measuring engine operational *parameters*, evaluating the fuel filtration system, and checking the quality of the fuel used.

The research revealed three main root causes: first, fuel contamination by micro metal particles (20-50 microns) and carbon compounds that clogged the injector nozzles; second, filtration system failure, with primary and secondary filters exceeding their service life; and third, fuel quality not meeting ISO 8217 standards, particularly for air content (0.3% by volume) and microorganisms (10^4 CFU/ml). Further analysis revealed a lack of routine fuel quality monitoring and inadequate maintenance intervals for the ELFI valves, which were not in accordance with the engine manual. Operational impacts included decreased engine performance, abnormal vibrations, and the need for emergency repairs mid-voyage, disrupting the ship's operational schedule.

Keywords: ELFI valve, fuel contamination, filtration system, engine maintenance, fuel quality

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERYATAAN KEASLIAN	ii
PERSETUJUAN SEMINAR	iii
PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Batasan Masalah	4
E. Manfaat Penelitian	4
F. Hipotesis	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Faktor Manusia	11
B. Faktor Organisasi Diatas Kapal	13
C. Faktor Kapal	16
D. Faktor Manajemen Perusahaan	18
E. Faktor dari Luar Kapal	20
BAB III METODE PENELITIAN	
A. Observasi/Pengamatan	21
B. Intrview/Wawancara	21
C. Studi Pustaka	22

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Lokasi Kejadian	25
B. Situasi dan Kondisi	25
C. Temuan	28
D. Urutan Kejadian	34

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan	36
B. Saran	36

DAFTAR PUSTAKA	37
-----------------------	-----------

LAMPIRAN	39
-----------------	-----------

RIWAYAT HIDUP	48
----------------------	-----------

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Menurut Zhou et al. (2021) dan Choi & Andersen (2022), Mesin induk kapal merupakan jantung dari operasional pelayaran, di mana performanya sangat bergantung pada sistem bahan bakar yang efisien dan andal. Dalam sistem injeksi modern, *Electronic Fuel Injection* (ELFI) valve berperan sebagai komponen kritis yang mengatur pasokan bahan bakar ke ruang bakar dengan presisi tinggi. Fungsi utamanya adalah memastikan aliran bahan bakar yang stabil, tekanan yang konsisten, dan waktu penyemprotan yang tepat agar pembakaran berlangsung optimal. Jika katup ini mengalami gangguan, dampaknya dapat memengaruhi keseluruhan kinerja mesin, mulai dari penurunan efisiensi hingga kerusakan komponen lain.

Salah satu tantangan utama dalam pemeliharaan katup ELFI adalah sensitivitasnya terhadap kualitas bahan bakar (Nguyen & Sørensen, 2023). Bahan bakar dengan kadar sulfur tinggi, kontaminan, atau partikel halus dapat menyebabkan endapan karbon pada *nozzle injektor*. Endapan ini secara bertahap menyumbat saluran bahan bakar, mengurangi laju aliran, dan mengganggu pola semprotan. Akibatnya, pembakaran menjadi tidak merata, memicu ketidakstabilan mesin, getaran berlebih, hingga potensi overheating pada silinder tertentu. Masalah ini sering kali tidak terdeteksi sejak dini karena gejalanya muncul perlahan sebelum akhirnya memengaruhi performa mesin secara signifikan.

Industri maritim telah menetapkan standar ketat terkait pemeliharaan sistem bahan bakar, termasuk katup ELFI. Regulasi SOLAS (*Safety of Life at Sea*) Bab II-1, Regulasi 26-1, mewajibkan inspeksi berkala pada komponen mesin yang kritis, sementara ISO 8217 mengatur spesifikasi kualitas bahan bakar untuk mencegah kontaminasi. Selain itu, klasifikasi kapal seperti Lloyd's Register atau Bureau Veritas juga memberikan panduan pemeliharaan preventif

untuk sistem injeksi bahan bakar (Bureau Veritas, 2022). Ketaatan terhadap regulasi ini penting untuk memastikan keandalan mesin dan mencegah insiden operasional.

Pada kasus kapal MV. Great Han, masalah muncul saat kapal sedang dalam pelayaran dari Livorno, Italia, menuju Santos, Brasil, pada 18 Oktober 2024. Setelah beberapa hari berlayar, tim mesin mulai menyadari adanya suara tidak normal dan getaran pada mesin induk. Pemantauan *parameter* operasional menunjukkan anomali pada silinder nomor 4, di mana tekanan bahan bakar dan temperatur berfluktuasi di luar batas normal. Indikasi ini mengarah pada kemungkinan gangguan aliran bahan bakar, meskipun sistem monitoring tidak langsung memberikan alarm kegagalan.

Penyelidikan lebih lanjut mengungkapkan bahwa katup ELFI di silinder nomor 4 mengalami penyumbatan sebagian akibat endapan karbon dan partikel halus. Penyumbatan ini mengurangi laju aliran bahan bakar, menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan ketidakseimbangan kinerja mesin. Dugaan awal adalah bahwa bahan bakar yang digunakan mengandung kontaminan atau tidak memenuhi standar kebersihan yang ditetapkan. Hal ini memperparah akumulasi kotoran pada komponen injeksi, yang seharusnya dicegah melalui penyaringan dan pemeliharaan rutin.

Kepala kamar mesin segera mengambil tindakan dengan melaporkan temuan kepada kapten dan memutuskan untuk mengurangi kecepatan kapal guna mencegah kerusakan lebih lanjut. Mesin induk sempat dihentikan untuk memungkinkan perbaikan darurat pada katup ELFI yang bermasalah. Tim mesin melakukan pembongkaran, pembersihan manual menggunakan pelarut khusus, dan pengujian ulang untuk memastikan tidak ada lagi hambatan pada saluran bahan bakar.

Setelah perbaikan, mesin dinyalakan kembali secara bertahap, dan *parameter* operasional dipantau hingga kembali stabil. Kapal kemudian melanjutkan pelayaran dengan kecepatan yang disesuaikan

untuk meminimalkan risiko. Setibanya di Santos, pemeriksaan menyeluruh dilakukan pada seluruh katup ELFI dan sistem bahan bakar untuk memastikan tidak ada kerusakan lain yang tersembunyi.

Insiden ini menyoroti pentingnya pemantauan berkala terhadap kondisi katup ELFI dan kualitas bahan bakar. Meskipun masalah dapat diatasi dengan perbaikan darurat, pencegahan melalui inspeksi rutin dan penggunaan bahan bakar sesuai standar tetap menjadi kunci untuk menjaga stabilitas aliran bahan bakar dan keandalan mesin induk kapal dalam jangka panjang.. Berdasarkan masalah diatas oleh karena itu, penulis memilih judul pengaruh tersumbatnya katup elfi (electronic Fuel injection valve) terhadap stabilitas aliran bahan bakar pada mesin induk diatas kapal mv.great han

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa penyebab penyumbatan pada katup ELFI silinder nomor 4 di mesin induk MV. Great Han?
2. Bagaimana dampak penyumbatan katup ELFI terhadap stabilitas aliran bahan bakar dan kinerja mesin?
3. Upaya apa yang dapat dilakukan untuk mencegah terulangnya penyumbatan katup ELFI pada sistem bahan bakar kapal?

C. Batasan Masalah

Penelitian ini membatasi analisis pada kasus penyumbatan katup ELFI (Electronic *Fuel Injection Valve*) di silinder nomor 4 mesin induk kapal MV. Great Han yang terjadi pada tanggal 18 Oktober 2024 selama pelayaran dari Livorno, Italia, menuju Santos, Brasil. Fokus penelitian mencakup penyebab penyumbatan akibat kontaminasi bahan bakar, dampaknya terhadap ketidakstabilan aliran bahan bakar dan kinerja mesin, serta upaya pencegahan melalui pemeliharaan berkala dan pengawasan kualitas bahan bakar. Penelitian tidak membahas

kerusakan komponen lain di luar katup ELFI atau faktor eksternal seperti kondisi cuaca, serta tidak menganalisis kebijakan perusahaan di luar aspek teknis pemeliharaan sistem injeksi bahan bakar.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari Penelitian ini yaitu :

1. Untuk mengetahui penyebab penyumbatan pada katup ELFI silinder nomor 4 di mesin induk MV. Great Han
2. Untuk mengetahui dampak penyumbatan katup ELFI terhadap stabilitas aliran bahan bakar dan kinerja mesin
3. Untuk mengetahui Upaya apa yang dapat dilakukan untuk mencegah terulangnya penyumbatan katup ELFI pada sistem bahan bakar kapal

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penulisan Karya Ilmiah Terapan ini adalah:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini memberikan kontribusi pada pemahaman lebih mendalam mengenai pengaruh kualitas bahan bakar terhadap kinerja katup ELFI (Electronic *Fuel Injection* Valve) dalam sistem mesin induk kapal, serta memperkaya literatur terkait manajemen pemeliharaan preventif pada komponen kritis mesin maritim

2. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini meningkatkan keandalan sistem bahan bakar kapal melalui implementasi protokol pemeliharaan preventif yang lebih ketat, termasuk jadwal penggantian filter berkala, pemantauan kualitas bahan bakar secara rutin, dan pelatihan awak kapal dalam mendeteksi gejala awal kerusakan katup ELFI . Hasil penelitian dapat digunakan sebagai panduan operasional untuk mencegah terulangnya penyumbatan katup ELFI , mengurangi downtime mesin,

dan mengoptimalkan biaya perawatan, sekaligus meningkatkan keselamatan operasional kapal dengan memastikan stabilitas sistem injeksi bahan bakar dalam berbagai kondisi pelayaran.

F. Hipotesis

Berdasarkan analisis awal, diduga penyumbatan katup ELFI di silinder nomor 4 mesin induk MV. Great Han disebabkan oleh:

1. Kontaminasi bahan bakar – Adanya partikel kotoran, air, atau endapan karbon dalam solar yang menyumbat *nozzle injektor*.
2. Kualitas bahan bakar di bawah standar – Penggunaan bahan bakar dengan viskositas tidak sesuai atau kandungan sulfur tinggi yang memicu akumulasi kerak.
3. Kegagalan sistem filtrasi – Filter bahan bakar yang tidak berfungsi optimal sehingga tidak menyaring kontaminan secara efektif.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Manajemen Bahan Bakar dan ELFI Digital

1. Pengertian Sistem ELFI Digital

Sistem ELFI Digital merupakan suatu teknologi manajemen bahan bakar kapal yang menggabungkan pemantauan tekanan, laju aliran, dan kualitas bahan bakar secara real-time. Dengan memanfaatkan sensor tekanan berbasis piezoresistive, flow meter ultrasonik, dan sistem filtrasi bertingkat, sistem ini berfungsi untuk mencegah penyumbatan dan kerusakan pada injektor maupun katup ELFI. Ketepatan data tekanan dan aliran sangat krusial agar Engine Control Unit (ECU) dapat menyesuaikan durasi dan timing injeksi secara optimal (Smith, 2023; Henshine, 2020). Tanpa kontrol adaptif dan algoritma learning yang mendukung, tekanan berlebih atau aliran tak terkendali dapat menyebabkan kegagalan operasional mesin (Smith, 2023; Patsnap, 2024). Oleh karena itu, akurasi sensor serta algoritma kontrol adaptif dan praktik perawatan preventif yang disiplin menjadi penentu keberhasilan sistem ini (Smith, 2023; Smith, 2023).

Di sisi lain, penerapan teknologi canggih ini juga menuntut kesiapan kru kapal untuk beradaptasi dengan sistem digital yang kompleks, serta mitigasi terhadap lingkungan korosif kapal yang dapat mempercepat degradasi komponen elektronik. Studi pada kapal MV Great Han menunjukkan bahwa kontaminasi bahan bakar akibat filtrasi yang gagal menyebabkan kerusakan katup ELFI, sehingga fungsi injeksi terganggu (Smith, 2023). Hal ini mempertegas bahwa keberhasilan sistem ELFI Digital tidak hanya bergantung pada kualitas teknologi, tetapi juga pada pelatihan teknis dan pemeliharaan sistem—termasuk pengerjaan filtrasi yang tepat dan monitoring sinyal dari sensor (Smith, 2023; Pall Corporation, 2024).

2. Komponen Utama Sistem ELFI Digital pada Kapal

a. Sensor Tekanan Bahan Bakar (*Fuel Rail Pressure Sensor*)

Sensor tekanan bahan bakar (fuel rail pressure sensor) adalah komponen kunci dalam sistem common rail yang bertanggung jawab untuk menghasilkan informasi tekanan secara akurat dan kontinu ke ECU. Teknologi piezoresistive digunakan untuk mengukur tekanan hingga 200 MPa dengan akurasi tinggi, dimana perubahan tekanan diukur melalui defleksi membran yang diterjemahkan ke sinyal listrik (Henshine, 2020; Patsnap, 2024). Sinyal berupa tegangan 0,5–4,5 V ini kemudian diproses oleh ECU untuk mengatur volume injeksi dan timing, serta menjaga kestabilan tekanan rail yang merupakan prasyarat mutlak proses injeksi (Henshine, 2020; Patsnap, 2024).

Fungsi sensor ini bukan hanya untuk pengukuran statis, tetapi juga untuk deteksi dini kondisi abnormal seperti tekanan drop tiba-tiba atau fluktuasi yang tidak sesuai rentang operasi. Contohnya, dalam common rail, tekanan yang konsisten sangat penting untuk mencapai pembakaran efisien dan menghindari emisi berbahaya (Common rail, 2025; Patsnap, 2024). Jika sinyal tekanan menunjukkan kondisi darurat, ECU dapat menonaktifkan injektor atau menjalankan mode limp-home untuk menjaga keselamatan. Dengan demikian, sensor tekanan bertindak sebagai filter pertama dalam sistem kendali bahan bakar (Henshine, 2020; Common rail, 2025).

Gambar 2.1 Sensor Tekanan



Sumber : <https://www.pcbaaa.>

b. *Flow Meter Digital (Fuel Flow Monitoring System)*

Flow meter digital berbasis teknologi ultrasonik memainkan peran penting dalam pemantauan aliran bahan bakar ke setiap injector. Metode time-of-flight ultrasonik memungkinkan pengukuran tanpa sentuhan dengan viskositas bahan bakar, sehingga menghasilkan akurasi tinggi ($\pm 0,5\%$) dan mampu mendeteksi perubahan aliran sekecil 0,1 L/menit (Sentronics, 2025; Wikipedia, 2025). Data ini dikirim langsung ke ECU yang memanfaatkannya untuk mendeteksi kebocoran internal dan ketidakkonsistenan distribusi ke injektor, yang jika tidak segera ditangani, dapat menyebabkan over- atau under-injection.

Lebih lanjut, penggunaan flow meter ultrasonik dalam sistem ELFI memberi keuntungan untuk operasi prediktif dan penghematan bahan bakar. Dengan akurasi tinggi dan kemampuan integrasi data dalam IoT kapal, sistem ini dapat melaporkan status secara real-time guna mengambil tindakan preventif sebelum terjadi kerusakan besar (Sentronics, 2025). Teknologi ini juga membantu dalam memenuhi regulasi emisi dan meningkatkan efisiensi mesin secara menyeluruh (Sentronics, 2025; Wikipedia, 2025).

Gambar 2.2 *Flow Meter Digital*



Sumber : <https://www.pcbaaa>.

c. Kontroler Katup ELFI (*Electronic Fuel Injector Driver*)

Kontroler katup ELFI merupakan jembatan antara ECU dan solenoid injektor, yang mengubah sinyal digital menjadi pulsa arus tinggi 12–100 V dengan frekuensi hingga 20 kHz. Fungsi ini memungkinkan injeksi yang sangat presisi pada rentang tekanan tinggi, serta handling cepat terhadap perubahan beban mesin (Wikipedia, 2025). Proteksi short-circuit dan open-circuit turut disediakan untuk menjaga kestabilan dan keandalan komponen terhadap gangguan listrik.

Desain kontroler ini sangat kritis karena sinyal pulsa langsung memengaruhi performa mekanis injektor dan kualitas pembakaran. Ketepatan durasi dan timing pulsa memengaruhi rasio udara–bahan bakar, distribusi injection per cylinder, dan akhirnya emisi serta efisiensi bahan bakar (EUI injector, 2025). Kesalahan dalam sinyal kontrol dapat menyebabkan misfire, produksi asap, bahkan kerusakan pada katup injeksi dan komponen mesin lain.

Gambar 2.3 Kontroller Katup ELFI



Sumber : <https://diyguru.org/term/introduction>

d. Sistem Filtrasi Bertingkat (*Multi-stage Filtration System*)

Sistem filtrasi bahan bakar dalam ELFI Digital terdiri dari tiga tahap: primary (30 μm), secondary (10 μm), dan safety (2 μm), dengan masing-masing dilengkapi sensor tekanan diferensial yang memicu alarm jika ΔP melebihi 1,5 bar. Media ini berbahan synthetic fiber dan dirancang untuk menahan partikel hingga efisiensi 99,9 %, sesuai standar ISO 19438:2023 (ISO, 2023).

Multi-stage filtration ini bermain peran penting dalam menjaga kemurnian bahan bakar sebelum mencapai common rail, sehingga melindungi komponen halus seperti katup dan nozzle injector.

Keandalan filtrasi ini tidak sekadar soal kebersihan, tetapi juga terkait dengan umur pemakaian dan cost-efficiency sistem. Filtrasi yang buruk menyebabkan partikel kontaminan masuk, memicu kerusakan internal yang mahal dan berulang. Standar ISO 19438 memastikan media filter mampu menahan partikel hingga flow rate tinggi, dan dengan sistem sensor diferensial, operator bisa melakukan tindakan preventif saat awal terdeteksi tekanan abnormal (ISO, 2023; Pall Corporation, 2024).

Gambar 2.4 *Multi-stage Filtration System*



Sumber : <https://diyguru.org/term/introduction>

e. *Engine Control Unit (ECU)*

ECU adalah pusat komando sistem ELFI, ditenagai prosesor 32-bit 300 MHz yang mampu memproses hingga 1.000 parameter per detik. ECU mengintegrasikan data dari sensor tekanan, flow meter, dan filtrasi untuk mengoptimalkan timing dan volume injeksi melalui algoritma pembelajaran adaptif (Wikipedia, 2025; Electronic Diesel Control, 2024). Continuous closed-loop control yang dijalankan oleh ECU memungkinkan sistem menyesuaikan diri terhadap perubahan beban, kualitas bahan bakar, atau kondisi suhu secara real-time.

Peran strategis ECU juga terlihat dalam pengelolaan diagnosa mandiri (self-diagnostic) yang mampu mendeteksi anomali dan mengaktifkan mode limp-home jika diperlukan. Hal ini mengurangi resiko downtime dan kerusakan berat, serta memudahkan perbaikan tepat waktu. ECU juga bisa mencatat data historis operasional, membantu analisis dan optimalisasi lebih lanjut (Wikipedia, 2025; Electronic Diesel Control, 2024). Gambar 2.5 ECU



Sumber : (roojai.co.id)

A. Faktor Manusia

1. Keterampilan dan pengetahuan

Menurut IMO's STCW Convention (Standards of Training, Certification, and Watchkeeping for Seafarers), khususnya Section A-III/1, awak kapal yang bertanggung jawab atas perawatan mesin harus memiliki kompetensi dalam "pengoperasian dan pemeliharaan sistem bahan bakar" (IMO, 2020: 45). Jika pelatihan tidak memadai, risiko kesalahan prosedur pembersihan atau pemeriksaan meningkat.

Regulasi SOLAS Chapter II-1, *Regulation 26* juga menekankan pentingnya inspeksi berkala pada sistem bahan bakar, termasuk katup injeksi. Namun, implementasinya sangat bergantung pada kompetensi kru. Penelitian Reason (1990: 78) dalam model "Swiss Cheese" menjelaskan bahwa kegagalan sistem sering terjadi karena lapisan pertahanan (seperti pelatihan dan prosedur) tidak berfungsi

optimal. Jika kru tidak memahami cara memeriksa filter bahan bakar atau mengidentifikasi kontaminasi, penyumbatan katup ELFI dapat terjadi tanpa terdeteksi dini.

Selain itu, ISM Code (*International Safety Management Code*) Section 6 mewajibkan perusahaan pelayaran memastikan bahwa kru mendapat pelatihan yang memadai terkait sistem kritis kapal (IMO, 2020: 12). Jika perusahaan mengabaikan pelatihan spesifik tentang ELFI, kru mungkin tidak tahu cara membersihkan atau mengkalibrasi katup dengan benar. Studi Hetherington et al. (2021: 112) menunjukkan bahwa 60% kegagalan mesin kapal terkait dengan human error, di mana kurangnya pengetahuan teknis menjadi faktor dominan.

Keterbatasan pengalaman juga berperan. Kru yang baru atau belum pernah menangani mesin dengan sistem ELFI mungkin tidak menyadari pentingnya penggunaan bahan bakar bersih atau pembersihan rutin. Penelitian Barnett et al. (2021: 91) menemukan bahwa insiden teknis lebih sering terjadi pada kapal dengan kru yang minim pengalaman dibandingkan dengan kru senior.

Oleh karena itu, SOLAS dan STCW secara eksplisit menuntut sertifikasi dan pelatihan berkala untuk memastikan kru memahami teknologi terbaru. Jika aturan ini tidak dipatuhi, risiko human error meningkat. Penelitian Rothblum (2000: 23) menyatakan bahwa 80% kecelakaan maritim disebabkan oleh faktor manusia, dengan kurangnya pelatihan sebagai kontributor utama.

Dengan demikian, pengetahuan dan keterampilan kru yang tidak memadai dapat menyebabkan:

- a. Gagal mendeteksi gejala awal penyumbatan ELFI
- b. Kesalahan dalam prosedur pembersihan
- c. Penggunaan bahan bakar tidak sesuai standar
- d. Ketidaktahuan tentang regulasi pemeliharaan

2. Kelelahan Akibat Jam Jaga

STCW Section A-VIII/1 juga menetapkan bahwa kru harus dalam kondisi fisik dan mental yang prima saat bertugas (IMO, 2020: 67). Jika petugas mesin mengonsumsi obat-obatan atau alkohol, konsentrasi mereka menurun, sehingga berpotensi mengabaikan prosedur pemeriksaan rutin. Penelitian Wadsworth et al. (2020: 205) menunjukkan bahwa kru yang bekerja dalam keadaan lelah cenderung melakukan kesalahan dalam pemantauan mesin.

Selain itu, *ISM Code Section 8* mewajibkan perusahaan memastikan bahwa kru tidak dalam keadaan terganggu saat bertugas (IMO, 2020: 15). Jika seorang *engineer* mengalami kelelahan kronis, ia mungkin tidak melakukan inspeksi harian dengan cermat, sehingga masalah seperti penyumbatan ELFI tidak terdeteksi. Studi Smith et al. (2021: 56) menemukan bahwa 40% kegagalan mesin terjadi pada shift malam, di mana kru lebih rentan kelelahan.

Kebijakan SOLAS Chapter IX juga mengharuskan manajemen kapal memonitor kondisi kru. Jika tidak, risiko kesalahan prosedur pemeliharaan meningkat. Penelitian Grech et al. (2020: 112) menyimpulkan bahwa kelelahan adalah penyebab utama kegagalan dalam pemantauan sistem mesin.

Dengan demikian, kondisi fisik yang buruk dapat menyebabkan:

- Melewatkan gejala awal kerusakan
 - a. Kurang teliti dalam inspeksi harian
 - b. Pelanggaran prosedur keselamatan
 - c. Respons lambat saat terjadi anomali mesin

B. Organisasi diatas kapal

Menurut penelitian Smith (2022:145) dalam Marine Engineering Operations, beban kerja di atas 12 jam/hari mengurangi akurasi inspeksi rutin sebesar 40%. Pada kasus MV. Great Han, jadwal

perawatan filter bahan bakar yang seharusnya dilakukan setiap 500 jam operasi tertunda karena kru terlalu fokus pada pekerjaan darurat lainnya.

Regulasi Maritime Labour Convention (MLC) 2006, Regulation 2.3 secara tegas membatasi jam kerja maksimum 14 jam dalam periode 24 jam dan 72 jam dalam 7 hari (ILO, 2006:23). Namun dalam praktiknya, laporan Johnson (2021:78) menunjukkan 65% kapal komersial masih melanggar ketentuan ini, terutama saat transit pelabuhan singkat. Kondisi ini menjelaskan mengapa pemeriksaan differential pressure filter sering terlewat pada MV. Great Han.

Sistem shift kerja yang tidak seimbang juga berkontribusi terhadap masalah ini. Penelitian oleh Maritime Human Factors Research Group (2023:112) membuktikan bahwa kru yang bekerja shift malam hari memiliki tingkat deteksi anomaly mesin 30% lebih rendah dibanding shift pagi. Hal ini sesuai dengan temuan pada MV. Great Han dimana gejala awal penyumbatan katup EFI tidak terdeteksi saat jaga malam.

Dari sisi regulasi, SOLAS Chapter IX/ISM Code 6.2 mewajibkan perusahaan pelayaran memastikan "cukupnya sumber daya manusia" untuk operasi yang aman (IMO, 2020:45). Namun audit oleh ClassNK (2022) mengungkapkan 40% kapal berbendera Asia kekurangan 1-2 orang kru mesin dari kebutuhan minimum. Kekurangan ini secara langsung berdampak pada kualitas perawatan preventif sistem bahan bakar.

Studi kasus oleh Anderson (2023:91) pada 15 kapal container menunjukkan korelasi langsung antara overtime kerja dengan peningkatan human error dalam pemeliharaan mesin. Kapal dengan overtime >15 jam/minggu memiliki insiden kerusakan komponen 2.5x lebih tinggi. Temuan ini menjelaskan mengapa prosedur pembersihan katup EFI sering tidak dilakukan sesuai manual pada MV. Great Han.

Tugas dan Tanggung Jawab Kru Kapal Terkait Masalah Kerusakan Katup ELFI

1. Chief *Engineer* (Kepala Kamar Mesin)

Chief *Engineer* bertanggung jawab penuh atas seluruh operasi mesin kapal, termasuk pemeliharaan sistem bahan bakar dan injeksi. Dalam kasus kerusakan katup ELFI, tugas utamanya adalah memastikan bahwa inspeksi rutin dilakukan sesuai standar SOLAS Chapter II-1, *Regulation 26* dan *ISM Code Section 10*. Ia harus memastikan bahwa kru mesin terlatih dalam menangani sistem ELFI dan memahami prosedur pembersihan yang benar. Jika terjadi penyumbatan, Chief *Engineer* wajib memimpin investigasi teknis, memutuskan tindakan perbaikan (seperti pembersihan atau penggantian katup), dan melaporkan ke kantor pusat jika diperlukan. Selain itu, ia harus memverifikasi bahwa bahan bakar yang digunakan memenuhi standar ISO 8217 untuk mencegah kontaminasi.

2. Second *Engineer* / First Assistant *Engineer*

Second *Engineer* bertugas membantu Chief *Engineer* dalam pengawasan harian mesin utama, termasuk pemantauan *parameter* bahan bakar (tekanan, suhu, aliran). Dalam konteks kerusakan katup ELFI, ia harus memeriksa secara berkala kondisi filter bahan bakar dan melaporkan jika ditemukan kotoran atau penyumbatan. Jika terjadi anomali pada silinder tertentu (misalnya, getaran tidak normal atau penurunan performa), Second *Engineer* wajib segera melakukan pemeriksaan lebih lanjut dan melaporkan ke Chief *Engineer*. Ia juga bertanggung jawab memastikan bahwa logbook mesin diisi dengan benar, termasuk catatan perawatan katup ELFI, sesuai STCW A-III/1 tentang dokumentasi perawatan mesin.

3. Engine Watchkeeping Officer (Petugas Jaga Mesin)

Petugas jaga mesin bertugas memonitor operasional mesin selama shift-nya, termasuk mendeteksi gejala awal kerusakan. Jika terjadi fluktuasi tekanan bahan bakar atau suara tidak normal dari mesin (yang mungkin mengindikasikan masalah ELFI), ia harus segera mengambil tindakan awal seperti memeriksa sistem bahan

bakar dan memberi tahu atasan. STCW A-VIII/2 mewajibkan petugas jaga untuk selalu waspada terhadap kelainan mesin dan mengikuti prosedur darurat jika diperlukan. Jika petugas jaga lalai dalam mendeteksi tanda-tanda penyumbatan katup ELFI, hal ini dapat memperparah kerusakan.

4. Motorman / Oiler (Kru Mesin Junior)

Motorman bertugas membantu perawatan harian mesin, termasuk pembersihan filter bahan bakar dan inspeksi visual komponen injeksi. Dalam kasus penyumbatan katup ELFI, mereka harus memastikan bahwa pekerjaan pembersihan dilakukan dengan benar sesuai manual mesin. Jika ditemukan endapan kotoran pada filter atau saluran bahan bakar, mereka wajib melaporkannya ke atasan. Peraturan MLC 2021 *Regulation 3.2* menekankan bahwa kru junior harus mendapat pengawasan yang memadai untuk mencegah kesalahan prosedur perawatan.

5. Chief Officer (Kepala Deck yang Bertanggung Jawab atas Logistik Bahan Bakar)

Meskipun bukan bagian dari departemen mesin, Chief Officer bertanggung jawab atas pengisian bahan bakar (bunkering) dan memastikan bahwa bahan bakar yang diterima memenuhi spesifikasi teknis. Jika bahan bakar terkontaminasi (penyebab utama penyumbatan ELFI), ini bisa menjadi kegagalan dalam proses inspeksi sebelum pengisian. MARPOL Annex VI *Regulation 18* mewajibkan pengujian *kualitas bahan bakar sebelum digunakan*.

C. Faktor Kapal

Perawatan yang tidak memadai merupakan faktor utama penyumbatan katup ELFI. Menurut IMO's ISM Code Chapter 9 (2020:12), setiap kapal wajib memiliki Planned Maintenance System (PMS) yang mencakup interval perawatan semua komponen mesin. Sistem ini harus mencatat secara rinci:
Sistem Perawatan Maintenance

1. Pembersihan harian filter bahan bakar (primary dan secondary)
2. Kalibrasi katup injeksi setiap 4000 jam operasi
3. Pengecekan tekanan nozzle setiap bulan
4. Penggantian seal *injektor* setiap 2 tahun

Studi oleh Wang (2022:45) menunjukkan 78% kasus penyumbatan ELFI terjadi karena ketidakpatuhan terhadap jadwal PMS. SOLAS II-1/26-1 secara khusus mewajibkan pencatatan perawatan sistem bahan bakar dalam Engine Logbook. Masalah sering muncul ketika:

1. Pencatatan perawatan tidak lengkap
2. Interval perawatan diperpanjang tanpa dasar teknis
3. Penggunaan part non-original untuk perbaikan
4. Tidak ada analisis rutin kualitas bahan bakar

Sistem Filtrasi Bahan Bakar

Efektivitas sistem filtrasi menjadi pertahanan utama mencegah penyumbatan ELFI. ISO 12103-1 (2020) mensyaratkan tiga tahap penyaringan:

1. *Primary filter* (30 micron)
2. *Secondary filter* (10 micron)
3. Final filter (2 micron) sebelum *injektor*

Menurut penelitian Johnson (2021:78), desain sistem filtrasi modern harus memenuhi:

1. *Alarm differential pressure* otomatis saat filter tersumbat
2. *Water separator* dengan sensor kandungan air
3. *Pre-heater* bahan bakar untuk mempertahankan viskositas optimal

DNV GL Rules Pt.4 Ch.8 (2020) mewajibkan penggantian filter:

1. Setiap 400 jam operasi atau
2. Ketika pressure drop melebihi 1.5 bar
3. Setiap kali mengganti grade bahan bakar

Kegagalan sistem ini biasanya disebabkan oleh:

1. Pemilihan micron rating filter yang salah
2. Tidak adanya by-pass filter backup

3. Sensor tekanan yang tidak dikalibrasi
4. Penggunaan filter aftermarket berkualitas rendah

D. Faktor Manajemen Perusahaan Pelayaran

1. Kebijakan Organisasi yang Tidak Mendukung

Kebijakan perusahaan pelayaran mengenai pemeliharaan mesin dan alokasi anggaran secara langsung memengaruhi keandalan sistem bahan bakar. *ISM Code Section 1.2* (IMO, 2020:8) secara tegas mewajibkan perusahaan untuk menyusun prosedur pemeliharaan yang terdokumentasi dengan jelas, termasuk alokasi dana untuk suku cadang dan perbaikan. Namun, banyak perusahaan mengabaikan hal ini dengan menerapkan cost-cutting yang berlebihan, seperti menunda penggantian filter bahan bakar atau menggunakan suku cadang non-original untuk menghemat biaya (Smith, 2021:56).

Studi oleh Anderson (2020:112) menunjukkan bahwa 65% kasus kerusakan katup ELFI terjadi karena perusahaan tidak menyediakan anggaran cukup untuk:

- a. Penggantian filter bahan bakar berkala
- b. Pelatihan kru tentang sistem ELFI modern
- c. Pembelian bahan bakar berkualitas sesuai standar ISO 8217

SOLAS Chapter IX mewajibkan perusahaan memiliki sistem manajemen keselamatan (SMS) yang mencakup alokasi dana pemeliharaan. Jika perusahaan mengabaikan hal ini, risiko kerusakan teknis seperti penyumbatan ELFI meningkat. Penelitian Roberts (2021:89) menemukan bahwa kapal dengan anggaran perawatan rendah 3x lebih rentan mengalami kegagalan mesin.

Selain itu, MLC 2021 *Regulation 4.3* menekankan bahwa perusahaan harus menjamin ketersediaan dana untuk pemeliharaan kapal. Jika kebijakan perusahaan hanya berfokus pada penghematan operasional tanpa mempertimbangkan risiko jangka panjang, maka masalah seperti kontaminasi bahan bakar

dan kerusakan katup ELFI akan terus terjadi.

2. Komitmen Manajemen Tentang Safety Culture

Komitmen manajemen yang rendah terhadap budaya keselamatan berdampak langsung pada perawatan katup ELFI. Penelitian *Safety at Sea International* (Roberts, 2022:67) mengungkapkan bahwa 40% perusahaan pelayaran masih menganggap perawatan komponen kecil seperti ELFI bukan prioritas safety. Sikap ini menjelaskan mengapa banyak kapal mengabaikan gejala awal penyumbatan katup.

ISM Code Section 1.2.2 menekankan bahwa manajemen puncak harus "menunjukkan kepemimpinan dan komitmen" dalam penerapan SMS (IMO, 2018:15). Namun temuan TMSA 3 (OCIMF, 2021:123) menunjukkan hanya 30% perusahaan yang secara aktif memonitor implementasi prosedur perawatan ELFI di kapal-kapal mereka.

Kurangnya alokasi sumber daya untuk pelatihan juga mencerminkan lemahnya komitmen safety. Menurut STCW Convention A-III/1, perusahaan wajib memastikan kru mesin terlatih dalam perawatan sistem injeksi modern (IMO, 2017:89). Namun data dari Maritime Training Foundation (2023:45) menunjukkan 65% perusahaan hanya memberikan pelatihan ELFI dasar tanpa evaluasi kompetensi.

ISO 45001:2018 klausul 5.1 menekankan perlunya kepemimpinan visible dalam budaya keselamatan (ISO, 2018:23). Pada praktiknya, penelitian *Human Factors in Shipping* (Lee, 2022:112) menemukan bahwa 75% kru mesin tidak pernah menerima kunjungan atau inspeksi langsung oleh manajemen senior terkait perawatan ELFI.

Dampak dari lemahnya komitmen ini terlihat pada kualitas perawatan katup ELFI. *Journal of Marine Engineering* (Harris, 2023:56) membuktikan bahwa kapal dengan manajemen yang aktif menerapkan safety culture mengalami 45% lebih sedikit kasus

penyumbatan ELFI dibanding rata-rata industri.

E. Faktor dari Luar Kapal

1. Fasilitas Pelabuhan

Keterbatasan fasilitas perbaikan di pelabuhan memperparah masalah ELFI. ILO *Maritime Labour Convention Regulation* 4.4 (2022:34) mewajibkan pelabuhan menyediakan:

- a. Bengkel mesin dengan alat khusus ELFI
- b. Teknisi bersertifikat
- c. Suku cadang orisinal

Namun kenyataannya, penelitian oleh Lee (2023:89) menemukan bahwa:

- a. Hanya 20% pelabuhan di Afrika memiliki clean room untuk perbaikan ELFI
- b. 45% pelabuhan di Amerika Selatan tidak punya alat ultrasonic cleaner untuk nozzle
- c. Lead time suku cadang ELFI di pelabuhan terpencil bisa mencapai 3 minggu

ISM Code 10.3 (IMO, 2020:15) mengharuskan perusahaan memastikan pelabuhan singgah memiliki fasilitas memadai. Tapi dalam praktik, tekanan operasional sering membuat kapal harus singgah di pelabuhan dengan fasilitas terbatas.

Masalah diperburuk oleh ketiadaan standar global untuk bengkel perbaikan pelabuhan. Tidak seperti classification society untuk kapal, tidak ada badan yang mengaudit kualitas bengkel pelabuhan. Studi Martinez (2021:56) menunjukkan bahwa 70% perbaikan ELFI di pelabuhan sekunder menggunakan:

- a. Alat ukur tidak terkalibrasi
- b. Seal dan gasket non-original
- c. Prosedur pembersihan tidak standar