

**ANALISIS FAKTOR PENYEBAB PENINGKATAN TEMPERATUR
MINYAK LUMAS SERTA STRATEGI PENGENDALIANNYA PADA
MESIN INDUK ASD TUG NTT BIDOR**



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

DANIEL BRUCE KARAENG

NIS: 25.11.102.008

AHLI TEKNIKATINGKAT I

PROGRAM DIKLAT PELAUT TINGKAT I
POLITEKNIK ILMU PELAYARAN MAKASAR

2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : DANIEL BRUCE KARAENG

Nomor Induk Siswa : 25.11.102.008

Program Pelatihan : AHLI TEKNIKA TINGKAT I

Menyatakan bahwa KIT dengan judul:

**ANALISIS FAKTOR PENYEBAB PENINGKATAN TEMPERATUR
MINYAK LUMAS SERTA STRATEGI PENGENDALIANNYA PADA
MESIN INDUK ASD TUG NTT BIDOR**

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 Ilmu Pelayaran Makassar

Makassar, Desember 2025



DANIEL BRUCE KARAENG

**PERSETUJUAN SEMINAR
KARYA ILMIAH TERAPAN**

Judul : **ANALISIS FAKTOR PENYEBAB PENINGKATAN
TEMPERATUR MINYAK LUMAS SERTA STRATEGI
PENGENDALIANNYA PADA MESIN INDUK ASD TUG
NTT BIDOR**

Nama Pasis : DANIEL BRUCE KARAENG
Nomor Induk Siswa : 25.11.102.008
Program Diklat : AHLI TEKNIKATINGKAT I

Dengan ini dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diseminarkan.

Makassar, 12 Januari 2026

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. H. AGUS SALIM, M.Si., M.Mar.E
NIP. 196308171998081001



SURAHMAN SULAIMAN.,SE.,M.Si.,M.Mar.E.
NIP. -

Mengetahui:
Manager Diklat
Peningkatan dan Penjenjangan



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

**ANALISIS FAKTOR PENYEBAB PENINGKATAN TEMPERATUR
MINYAK LUMAS SERTA STRATEGI PENGENDALIANNYA PADA
MESIN INDUK ASD TUG NTT BIDOR**

Disusun dan Diajukan Oleh:

**DANIEL BRUCE KARAENG
NIS. 25.11.102.008
AHLI TEKNIKATINGKAT I**

Telah dipresentasikan di depan Panitia Ujian KIT
Pada Tanggal 12 Januari 2026

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. H. AGUS SALIM, M.Si., M.Mar.E
NIP. 196308171998081001



SURAHMAN SULAIMAN.,SE.,M.Si.,M.Mar.E.
NIP.

Mengetahui:

A.n Direktur

Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
Pembantu Direktur I



Capt. FAISAL SARANSI, M.T., M.Mar.
NIP. 19750329 1999031002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadirat 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 Teknika Tingkat I (ATT I) dalam menyelesaikan studinya pada program ATT I di Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.

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

1. Bapak Capt. Rudy Susanto, M.Pd. selaku Direktur Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
2. Bapak Ir. Suyuti, M.Si., M.Mar.E. selaku Manager Diklat Teknis Peningkatan dan Penjenjangan Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
3. Bapak Dr. H. Agus Salim, M.Si., M.Mar.E selaku pembimbing I penulisan KIT ini.
4. Bapak Surahman Sulaiman.,SE.,M.Si.,M.Mar.E. selaku pembimbing II penulisan KIT ini.
5. Seluruh Staf Pengajar Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar atas bimbingan yang diberikan kepada penulis selama mengikuti Program Diklat Ahli TEKNIKATingkat I di PIP Makassar.
6. Rekan-rekan Pasis Angkatan XLVIII Tahun 2025
7. Kedua orang tuaku tercinta, Bapak, Ibu, Istri Anak serta saudara saudaraku 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 KIT ini.

Makassar, Desember 2025



DANIEL BRUCE KARAENG

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
PERSETUJUAN SEMINAR	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	
DAFTAR GAMBAR	
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Batasan Masalah	3
D. Tujuan Penelitian	4
E. Manfaat Penelitian	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Faktor Manusia	9
B. Organisasi diatas Kapal	11
C. Pekerjaan dan Lingkungan Kerja	13
D. Faktor Kapal	16
E. Faktor Manajemen Perusahaan pelayaran	19
F. Faktor dari luar kapal	21
 BAB III METODE PENGAMBILAN DATA	
A. Observasi/Pengamatan	24
B. Interview/Wawancara	25
C. Studi Pustaka	25
 BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
A. Lokasi Kejadian	27
B. Situasi dan Kondisi	27
C. Temuan	32
D. Urutan Kejadian	43
 BAB V PENUTUP	
A. Simpulan	48
B. Saran	48
 DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 4.1 Keadaan Normal	31
Tabel 4.2 Keadaan Kerusakan	31
Tabel 4.3 Setelah Perbaikan	32
Tabel 4.4 Urutan Kejadian	43

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 4.1 Keadaan Cooler	33
Gambar 4.2 Intercooler ME	33

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sistem pelumasan pada mesin induk kapal merupakan komponen kritis yang berfungsi ganda yakni melumasi bagian-bagian yang bergesekan dan mendinginkan komponen yang bersuhu tinggi. Temperatur minyak lumas yang stabil dalam rentang yang ditetapkan pabrikan merupakan indikator utama kesehatan mesin dan efisiensi sistem pendinginannya. Kestabilan suhu ini menjamin kekentalan (viskositas) minyak yang optimal, sehingga lapisan pelindung antar logam dapat terbentuk sempurna dan panas dari pembakaran serta gesekan dapat dibuang dengan efektif. Setiap penyimpangan suhu, terutama kenaikan di atas batas maksimum operasional, menandakan adanya gangguan pada keseimbangan termal sistem yang dapat mengarah pada penurunan performa, percepatan keausan komponen, dan potensi kerusakan mesin yang serius.

Dalam kerangka operasional kapal niaga, pemeliharaan sistem mesin induk, termasuk sistem pelumasan, diatur secara ketat oleh standar internasional dan peraturan klasifikasi. Konvensi SOLAS (*Safety of Life at Sea*) Bab II-1, Regulasi 26-1, menekankan keandalan instalasi tenaga penggerak dan sistem pendukungnya. Lebih spesifik, peraturan dari badan klasifikasi seperti Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) mensyaratkan agar semua sistem esensial, termasuk sistem pendingin minyak lumas, dirancang dan dipelihara untuk beroperasi dengan aman dalam semua kondisi layanan yang diantisipasi. Kewajiban pemantauan parameter kritis seperti suhu dan tekanan minyak lumas merupakan bagian integral dari pemenuhan standar keselamatan ini, sehingga setiap anomali bukan hanya masalah teknis, tetapi juga menyangkut aspek kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku.

ASD Tug (*Azimuth Stern Drive Tug*) adalah kapal tunda modern yang dilengkapi dengan dua unit penggerak azimuth (*azimuth thruster*)

yang dipasang di bagian buritan (*stern*) kapal. Masing-masing thruster dapat berputar 360 derajat, sehingga menghasilkan kemampuan manuver yang sangat tinggi dan responsif. Secara operasional, ASD Tug dirancang untuk memberikan gaya dorong dan tarik (*push-pull*) yang presisi dalam berbagai kondisi pelabuhan maupun *offshore*. Kombinasi tenaga mesin besar dan sistem propulsi azimuth memungkinkan kapal ini melakukan perubahan arah secara cepat tanpa ketergantungan pada kemudi konvensional.

Berdasarkan pengalaman penulis yang luas di kapal-kapal sejenis, salah satu masalah paling umum dan berulang yang memicu peningkatan Temperatur minyak lumas adalah penurunan efisiensi perpindahan panas pada *lube oil cooler*. Masalah ini biasanya berakar pada fenomena *fouling* atau penyumbatan pada sisi *tube cooler* yang dialiri air laut sebagai media pendingin. Secara bertahap, endapan kerak mineral (*scale*) dari air laut, lumpur, dan pertumbuhan organisme laut (*biofouling*) menempel dan menumpuk di permukaan dalam *tube cooler*. Lapisan endapan ini bertindak sebagai isolator panas yang sangat efektif, sehingga menghambat proses perpindahan panas dari minyak lumas yang panas ke air laut yang dingin. Akibatnya, panas yang seharusnya terbuang justru tertahan dalam sirkulasi minyak, menyebabkan suhu minyak secara bertahap namun pasti terus meningkat. Proses *fouling* ini sering kali bersifat perlahan dan tersembunyi, sehingga baru terdeteksi ketika kapasitas pendinginan *cooler* sudah sangat berkurang dan tidak lagi mampu menangani beban panas mesin pada kondisi operasi normal.

Pada tanggal 16 Juli 2025, pukul 14:25 Wita, ketika ASD Tug NTT Bidor sedang berlayar di Laut Cina Selatan dalam rute dari Port Dickson menuju Miri, Malaysia, alarm suhu tinggi untuk minyak lumas mesin induk kanan berbunyi. Pengecekan di panel kontrol menunjukkan angka yang mengkhawatirkan: Temperatur minyak lumas yang biasanya tercatat stabil pada rentang aman 52°C hingga 54°C

telah melonjak tajam dan menetap pada 70°C. Angka ini jauh melebihi batas maksimum operasional yang ditetapkan pada 65°C dan batas alarm yang disetel pada suhu yang sama. Lonjakan sebesar 16°C hingga 18°C dari suhu normal ini mengindikasikan kegagalan mendadak atau kelebihan beban yang parah pada sistem pendingin.

Oleh karena itu, analisis terhadap faktor-faktor yang menyebabkan penurunan kinerja *cooler* menjadi sangat penting. Pemahaman yang mendalam tentang mekanisme *fouling*, interval pembersihan yang optimal, dan kualitas media pendingin (air laut) diperlukan untuk merumuskan strategi pengendalian yang efektif. Strategi ini bertujuan untuk mencegah terulangnya kejadian serupa, yang tidak hanya mengganggu operasional tetapi juga berpotensi mengancam keselamatan kapal dan awaknya. Dengan demikian, studi ini difokuskan untuk mengidentifikasi akar penyebab peningkatan Temperatur tersebut dan menyusun rekomendasi strategis berdasarkan bukti operasional yang nyata..Berdasarkan pengalaman di atas, penulis tertarik untuk mengangkat masalah tersebut dan menuangkannya dalam bentuk Karya Ilmiah Terapan (KIT) dengan judul “Analisis Faktor Penyebab Peningkatan Temperatur Minyak Lumas Serta Strategi Pengendaliannya Pada Mesin Induk ASD Tug NTT Bidor”

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Faktor-faktor apa saja yang menyebabkan peningkatan Temperatur minyak lumas pada mesin induk kapal ASD Tug NTT Bidor?
2. Bagaimana strategi pengendalian yang efektif untuk mencegah peningkatan Temperatur minyak lumas pada mesin induk tersebut?

C. Batasan Masalah

Berdasarkan kejadian spesifik di atas, penelitian ini secara

husus membatasi analisis pada kasus peningkatan Temperatur minyak lumas yang terjadi pada mesin induk sebelah kanan di kapal ASD Tug NTT Bidor pada tanggal 16 Juli 2025, pukul 14:25 WITA, saat kapal berlayar di perairan Laut Cina Selatan dalam pelayaran dari Port Dickson menuju Miri, Malaysia. Fokus kajian difokuskan pada identifikasi faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan fungsi sistem pendingin minyak pelumas (*lube oil cooling system*) dalam rentang waktu operasional tersebut, serta penyusunan strategi pengendalian teknis dan prosedural yang langsung dapat diterapkan untuk mencegah terulangnya insiden serupa pada kapal dan mesin yang sama.

D. Tujuan Penulisan

Penelitian ini bertujuan untuk :

- 1) Untuk mengetahui faktor apa saja yang menyebabkan peningkatan Temperatur minyak lumas pada mesin induk kapal ASD Tug NTT Bidor
- 2) Untuk mengetahui strategi pengendalian yang efektif untuk mencegah peningkatan Temperatur minyak lumas pada mesin induk

E. Manfaat Penulisan

1. Manfaat Teoritis
 - a. Memberikan kontribusi pada disiplin ilmu teknik permesinan kapal dan teknik perawatan khususnya dalam memahami mekanisme kegagalan sistem pendingin minyak lumas
 - b. Memperkaya khasanah studi kasus dan literatur teknik mengenai analisis kinerja *lube oil cooler* dalam kondisi operasional laut lepas yang riil
 - c. Mengembangkan model atau kerangka analisis untuk mendiagnosis masalah peningkatan Temperatur secara sistematis berdasarkan data operasional.

2. Manfaat Praktisnya

- a. Sebagai pedoman teknis bagi awak kapal dalam melakukan pemeliharaan preventif dan korektif pada sistem pendingin minyak lumas
- b. Meningkatkan kesiapsiagaan dan prosedur tanggap darurat perwira jaga dalam menghadapi alarm Temperatur tinggi
- c. Mengurangi risiko kerusakan mesin induk yang lebih parah dan biaya perbaikan yang besar
- d. Menjadi acuan untuk penyusunan program pemeliharaan berkala yang lebih efektif pada kapal-kapal sejenis
- e. Mendukung kepatuhan terhadap aturan keselamatan pelayaran dan standar melalui pemeliharaan sistem yang terdokumentasi

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Pelumasan (*Lube Oil System*) Mesin Induk Kapal

Sistem pelumasan pada mesin induk kapal merupakan jantung dari operasi permesinan yang berfungsi untuk memastikan keandalan, umur pakai, dan efisiensi mesin utama penggerak kapal. Sistem ini dirancang untuk melumasi seluruh komponen bergerak dalam kondisi ekstrem—tekanan tinggi, suhu tinggi, dan lingkungan korosif—sambil secara simultan berperan sebagai media pendingin utama untuk bagian-bagian kritis seperti bantalan utama (*main bearing*), bantalan engkol (*crankpin bearing*), dan bagian bawah piston. Selain itu, sistem ini berfungsi membersihkan partikel keausan dan residu pembakaran, serta melindungi permukaan logam dari korosi. Stabilitas parameter operasionalnya, terutama suhu dan tekanan, adalah indikator langsung kesehatan mesin. Gangguan pada sistem ini, seperti peningkatan suhu yang drastis, dapat dengan cepat mengarah pada kerusakan katastropik mesin induk.

Secara teknis, sistem ini merupakan sirkulasi tertutup yang terdiri dari tangki cadangan (*lube oil drain tank*), pompa sirkulasi utama dan standby, *lube oil cooler*, pemisah sentrifugal (*centrifuge*), filter halus dan kasar, katup pengaman (*relief valve*), serta jaringan pipa dan sensor yang kompleks. Berbeda dengan mesin bantu, sistem pada mesin induk memiliki kapasitas dan tekanan yang jauh lebih besar, serta sering dilengkapi dengan sistem pemurnian (*purification system*) yang berjalan kontinu untuk menjaga kualitas minyak. Performa sistem sangat bergantung pada integritas setiap komponen, terutama efisiensi perpindahan panas pada *cooler* dan kemampuan filtrasi. Pemisahan yang sempurna dari sistem fluida lain, seperti sistem bahan bakar atau pendingin air tawar, adalah mutlak, karena kontaminasi sekecil apapun dapat merusak sifat minyak dan merusak bantalan berpresisi tinggi.

Fungsi Utama Sistem Pelumasan Mesin Induk:

1. Pelumasan (*Lubrication*) dan Pembentukan Film: Menciptakan lapisan film minyak (*oil film*) yang stabil dan kontinu di antara permukaan logam

yang bergerak dengan kecepatan dan tekanan sangat tinggi, seperti antara journal dan bantalan poros engkol, untuk mencegah kontak logam langsung dan keausan.

2. Pendinginan (*Cooling*) Termal: Berfungsi sebagai media pendingin utama untuk komponen yang tidak terjangkau oleh sistem pendingin air, terutama bantalan-bantalan besar dan bagian bawah piston, dengan menyerap panas dan membuangnya melalui *lube oil cooler*.
3. Pembersihan (*Cleaning*) dan Transportasi Kotoran: Mencegah akumulasi karbon, lumpur (*sludge*), dan partikel logam hasil keausan dengan membawanya ke filter dan purifier untuk disingkirkan dari sirkulasi.
4. Perlindungan (*Protection*) terhadap Korosi: Melapisi permukaan logam internal dengan film minyak untuk melindunginya dari uap air dan asam hasil pembakaran yang dapat menyebabkan karat dan korosi.
5. Perapat Hidrolik (*Hydraulic Sealing*): Membantu menciptakan seal antara ring piston dan dinding liner silinder, serta berperan sebagai fluida kerja untuk aktuasi katup atau pengatur injeksi pada beberapa desain mesin.

Komponen Utama Sistem Pelumasan Mesin Induk:

1. Tangki Minyak Pelumas (*Lube oil Drain Tank* atau *Sump Tank*)
Tangki ini berfungsi sebagai reservoir sirkulasi tertutup, menampung minyak yang kembali dari mesin, memungkinkan pelepasan udara (*deaeration*), dan sebagai titik pengisian. Berbeda dengan mesin kecil, tangki ini terpisah dari bak engkol (*crankcase*) dan memiliki kapasitas sangat besar.
Karakteristik: Dilengkapi dengan *level gauges*, alarm level rendah, heater untuk pemanasan awal, dan suction strainer untuk pompa. Kontaminasi air atau bahan bakar sering kali terdeteksi pertama kali di sini melalui pemeriksaan rutin atau analisis sampel.
2. Pendingin Minyak Pelumas : Merupakan komponen paling kritis dalam mengendalikan suhu operasi. Biasanya berupa *shell and tube heat exchanger*, di mana minyak panas mengalir di sisi shell dan air laut

(atau air tawar sekunder) sebagai media pendingin mengalir di dalam *tube*.

Karakteristik: Desainnya harus memiliki margin kapasitas pendinginan yang cukup. Kerusakan atau penurunan efisiensinya, seperti akibat *fouling* pada *tube*, langsung berdampak pada kenaikan suhu minyak sistem secara keseluruhan. Dilengkapi dengan katup *thermostatic* untuk mengatur laju aliran *bypass* guna mempertahankan suhu minyak outlet yang optimal.

3. Penyaring dan Pemurni Minyak Pelumas (*Filters & Purifier*)
Sistem ini memiliki dua garis pertahanan: filter (baik *full-flow* maupun *by-pass*) untuk menyaring partikel padat, dan purifier sentrifugal (*centrifuge*) untuk memisahkan kontaminan cair (air) dan partikel halus berdasarkan perbedaan massa jenis.

Karakteristik: Filter dilengkapi dengan *differential pressure indicator*. Peningkatan delta-P yang cepat mengindikasikan penyumbatan. Purifier berjalan kontinu atau berkala untuk menjaga kualitas minyak, terutama pada mesin induk berbahan bakar berat (*HFO*) yang rentan terhadap kontaminasi asam dan karbon.

4. Pompa Sirkulasi Minyak Pelumas (*Lube oil Circulation Pumps*)
Biasanya terdiri dari satu pompa utama yang digerakkan mesin dan satu pompa listrik standby (*pre-lubrication* dan cadangan). Fungsinya untuk mensirkulasikan minyak dengan tekanan dan laju aliran konstan ke seluruh sistem.

Karakteristik: Tekanan discharge pompa adalah parameter vital yang terus dipantau. Penurunan tekanan dapat mengindikasikan masalah pada pompa, kebocoran besar, atau penyumbatan di hisap. Dilengkapi dengan *relief valve* di sisi discharge untuk proteksi dari overpressure.

5. Katup Pengatur Tekanan dan Suhu (*Pressure Relief Valve & Thermostatic Valve*)
Pressure Relief Valve berfungsi sebagai pengaman tekanan maksimum sistem, sedangkan *Thermostatic Valve* mengatur aliran minyak melalui *cooler* atau *bypass* untuk

mempertahankan suhu minyak masuk mesin pada kisaran optimal (biasanya 45-55°C).

Karakteristik: Kegagalan *thermostatic valve* (misalnya macet terbuka) akan menyebabkan minyak tidak didinginkan sama sekali dan langsung memicu kenaikan suhu sistem secara cepat. Kalibrasi dan fungsi katup-katup ini harus diperiksa secara berkala.

A. Faktor Manusia

Pengetahuan dan Keterampilan kru

Pengetahuan yang kurang mendalam tentang prinsip kerja *lube oil cooler*, mekanisme perpindahan panas, serta gejala awal terjadinya *fouling* atau penyumbatan dapat menyebabkan ketidakmampuan dalam mengidentifikasi tanda-tanda penurunan performa sistem secara dini. Sebagai contoh, pemahaman yang tidak memadai mengenai hubungan antara tekanan diferensial (*differential pressure*) pada *cooler* dengan laju aliran dan efisiensi pendinginan dapat mengakibatkan kesalahan interpretasi data operasional. Hal ini selaras dengan temuan Hetherington et al. (2019) yang menegaskan bahwa kesalahan diagnosis teknis sering berakar pada kurangnya pemahaman konseptual sistem yang kompleks.

Keterbatasan keterampilan praktis dalam melakukan inspeksi dan perawatan rutin pada *lube oil cooler* juga menjadi penyebab utama. Prosedur pembersihan (*cleaning*) *tube cooler* yang tidak tepat, seperti penggunaan alat yang tidak sesuai atau teknik *chemical cleaning* yang tidak sesuai standar, dapat meninggalkan residu atau bahkan merusak permukaan *tube*, sehingga justru mempercepat proses *fouling* berikutnya. Kurangnya pengalaman dalam membongkar (*dismantling*), memeriksa, dan merakit kembali *cooler* sesuai spesifikasi pabrikan berpotensi menimbulkan kebocoran atau gangguan sirkulasi. Penelitian oleh Martins & Menezes (2021) menunjukkan bahwa 34% kegagalan

peralatan bergerak di kapal berkaitan langsung dengan kesalahan prosedur pemeliharaan yang dilakukan oleh kru yang kurang terlatih.

Dari perspektif regulasi, standar kompetensi minimum bagi perwira mesin telah ditetapkan secara internasional. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) Code*, sebagaimana diamandemen Manila, secara eksplisit menetapkan kompetensi wajib untuk perwira teknik tingkat operasional dan manajerial. Misalnya, Tabel A-III/1 menguraikan kompetensi dalam "Pemeliharaan dan Perbaikan Mesin Listrik dan Peralatan Kelistrikan" serta "Pengoperasian Pompa dan Sistem Pipa", yang mencakup pemahaman sistem pendingin. Namun, implementasi dan penilaian kedalaman pemahaman ini sangat bergantung pada kualitas institusi pelatihan dan program *onboard training* di kapal.

Keterampilan yang harus dimiliki oleh kru kamar mesin untuk mencegah dan mengatasi peningkatan Temperatur minyak lumas:

1. Kemampuan Membaca dan Menganalisis *Trend* Parameter Mesin
 - a. Keterampilan menginterpretasi data historis dari *data logger* atau *logbook* untuk mengidentifikasi pola kenaikan suhu yang gradual, yang mengindikasikan penurunan efisiensi *cooler*.
 - b. Kemampuan membedakan antara fluktuasi suhu normal dan deviasi yang mengkhawatirkan.
2. Keahlian dalam *Predictive dan Preventive* (Pemeliharaan Prediktif dan Preventif)
 - a. Kompetensi dalam mengambil sampel minyak lumas (*lube oil sampling*) dan memahami laporan analisis laboratorium untuk mendeteksi kontaminasi air, fuel dilution, atau degradasi.

- b. Kemampuan menjalankan jadwal perawatan berkala (*planned maintenance system*) untuk sistem pendingin secara konsisten dan akurat.
- 3. Kompetensi *Troubleshooting* Sistematis pada Sistem Pendingin
 - a. Keahlian dalam mengisolasi bagian sistem (*cooler*, katup, pompa) secara cepat untuk mencari akar masalah.
 - b. Kemampuan melakukan pemeriksaan berurutan, seperti memverifikasi kerja *thermostatic valve*, aliran *sea water*, dan kebersihan *strainer*.
- 4. Keterampilan Khusus dalam Perawatan *Lube oil Cooler*
 - a. Kemampuan melakukan prosedur pembongkaran (*dismantling*), inspeksi visual *tube* , serta pembersihan mekanis (*rodding*) dan kimiawi (*chemical cleaning*) yang benar.
 - b. Keahlian dalam perakitan ulang (*reassembly*) dan pengujian tekanan (*pressure test*) untuk mencegah kebocoran pasca-perawatan.
- 5. Pemahaman *System Interconnection* (Keterkaitan Sistem)

Pengetahuan tentang bagaimana performa sistem pendingin sekunder (*sea water system*) dan sistem pengolahan air mentah (*sea chest*) secara langsung memengaruhi efisiensi *lube oil cooler*.
- 6. Kedisiplinan Prosedural dan Kepatuhan terhadap Regulasi
 - a. Konsistensi dalam menggunakan *checklist* operasi dan pemeliharaan.
 - b. Kebiasaan untuk selalu merujuk dan mematuhi prosedur yang dalam *Safety Management System (SMS)* perusahaan dan manual pabrikan mesin.

B. Organisasi diatas Kapal

Dalam lingkungan operasional kapal, terutama pada kapal dengan *minimum safe manning* yang ketat, setiap anggota kru sering

kali menanggung banyak tanggung jawab dan tugas lintas fungsi. Ketika jumlah personel di kamar mesin tidak memadai untuk secara efektif melaksanakan semua tugas pemeliharaan rutin, inspeksi mendetail, dan pemantauan operasional secara bersamaan, maka tugas-tugas yang dianggap "kurang mendesak" seperti inspeksi visual berkala pada *lube oil cooler* atau analisis tren parameter halus sering kali tertunda atau terabaikan. Penelitian oleh Zhao et al. (2023: 112) mengonfirmasi bahwa *under-manning* secara signifikan berkorelasi dengan peningkatan *maintenance backlog* dan penurunan kualitas inspeksi, yang pada akhirnya meningkatkan risiko kegagalan peralatan kritis.

Dari perspektif regulasi, penentuan komposisi kru yang aman sebenarnya telah diatur dalam kerangka hukum internasional. *Maritime Labour Convention (MLC) 2006*, sebagaimana diamandemen, pada Regulation 2.7 (Manning Levels) dengan jelas menyatakan bahwa setiap kapal harus dijaga dengan jumlah awak kapal yang memadai (*sufficient number*) untuk menjamin keselamatan dan keamanan kapal dalam semua kondisi, serta untuk mencegah kelebihan beban kerja (*excessive hours of work*). Prinsip "cukup" ini tidak hanya merujuk pada jumlah fisik, tetapi juga pada kualifikasi dan pengalaman. Namun, penetapan angka spesifik *safe manning* sering kali menjadi wewenang otoritas bendera (*flag state*), dan dalam praktiknya, angka tersebut kerap ditetapkan pada batas minimal absolut untuk alasan efisiensi biaya, sehingga menciptakan kondisi *chronic understaffing* yang berisiko.

Tugas dan Tanggung Jawab Kru Berdasarkan Masalah Peningkatan Temperatur Minyak Lumas:

1. Perwira Jaga Mesin (Engineer Officer of the Watch - EOW):

Bertanggung jawab penuh atas pemantauan berkelanjutan terhadap semua parameter mesin induk, termasuk Temperatur minyak lumas, selama jam jaganya. Tugasnya adalah secara aktif mengamati dan mencatat setiap tren kenaikan suhu yang tidak

normal, sekalipun masih dalam batas hijau, serta segera mengambil tindakan awal sesuai prosedur jika alarm berbunyi atau parameter menyimpang, seperti memeriksa panel indikator dan melakukan inspeksi visual cepat.

2. Kepala Kamar Mesin (*Chief Engineer*):

Memiliki tanggung jawab keseluruhan terhadap kondisi teknis semua mesin dan peralatannya. Dalam konteks ini, tugasnya adalah memastikan program pemeliharaan preventif untuk sistem pelumasan dan pendingin dilaksanakan sepenuhnya, termasuk pembersihan *lube oil cooler* sesuai jadwal. Ia juga bertugas menganalisis laporan insiden, menentukan akar penyebab, dan mengoordinasikan perbaikan yang mendalam serta pelaporan kepada kantor pusat.

3. Asisten Kepala Mesin (*Second Engineer/First Assistant Engineer*):

Bertugas melaksanakan program pemeliharaan harian dan berkala yang ditetapkan oleh *Chief Engineer*. Secara spesifik, ia harus memastikan pekerjaan pemeliharaan pada sistem pendingin minyak lumas, seperti inspeksi, pembersihan, dan penggantian komponen, dilakukan dengan benar dan terdokumentasi. Ia juga membantu dalam troubleshooting teknis yang kompleks.

4. Juru Minyak (*Oiler/Motorman*):

Melaksanakan tugas operasi rutin dan bantuan pemeliharaan di bawah pengawasan perwira mesin. Tugasnya mencakup pengambilan sampel minyak lumas untuk dianalisis, pembersihan strainer, membantu dalam pekerjaan pembongkaran *cooler*, serta melaporkan setiap keanehan, kebocoran, atau suara tidak biasa yang ditemui selama round inspeksi ke perwira yang berjaga.

C. Faktor Pekerjaan dan Lingkungan Kerja.

Ketersediaan dan Kesesuaian Alat Kerja

Ketersediaan, kecukupan, dan kesesuaian alat kerja serta perangkat diagnostik yang diperlukan untuk melakukan pemeliharaan dan inspeksi yang efektif pada sistem pendingin minyak lumas. Kru

kamar mesin memerlukan peralatan yang tepat untuk melaksanakan tugasnya, mulai dari peralatan tangan (*hand tools*) standar untuk pembongkaran, alat khusus seperti *tube brush* atau *rodding gun* untuk pembersihan *cooler*, hingga perangkat diagnostik yang lebih canggih seperti *infrared thermometer (temp gun)*, *portable vibration meter*, atau bahkan akses ke sistem *condition monitoring* yang terintegrasi. Ketidaktersediaan atau kesulitan mengakses alat-alat yang tepat dapat menyebabkan pemeliharaan ditunda, dilakukan dengan cara yang tidak memadai (*improvisasi*), atau sama sekali tidak dilakukan. Sebagai contoh, tanpa *tube brush* yang sesuai ukuran diameter *tube cooler*, proses pembersihan *fouling* hanya akan dilakukan secara superfisial, meninggalkan endapan yang mengurangi efisiensi perpindahan panas. Penelitian oleh Alvandi & Mehryaar (2022: 88) menekankan bahwa *improper tools* adalah kontributor signifikan terhadap kegagalan pemeliharaan berulang dan peningkatan waktu *downtime* peralatan.

Regulasi maritim internasional memberikan kerangka umum tentang kewajiban penyediaan sumber daya. *International Safety Management (ISM) Code*, pada Bagian 6 (Sumber Daya dan Personel), dengan jelas menyatakan bahwa perusahaan harus memastikan bahwa setiap kapal dilengkapi dengan peralatan dan perlengkapan yang memadai (*adequate equipment and supplies*). Klausul ini mencakup tidak hanya peralatan keselamatan, tetapi juga peralatan operasional dan pemeliharaan. Lebih lanjut, *Maritime Labour Convention (MLC) 2006*, pada Regulation 4.3 mengenai kesehatan dan keselamatan kerja, mewajibkan kapal memiliki kebijakan keselamatan dan kesehatan kerja yang mencakup pelatihan dalam penggunaan peralatan serta penyediaan alat pelindung diri dan peralatan lainnya yang diperlukan untuk keselamatan pekerja. Meskipun tidak merinci daftar peralatan teknis, prinsip "kelayakan laut" (*seaworthiness*) yang merupakan dasar dari banyak konvensi, mensyaratkan kapal untuk dilengkapi dengan baik untuk pelayarannya, yang secara implisit mencakup kemampuan untuk melakukan perawatan dasar.

Alat yang Dibutuhkan Kru untuk Pemeliharaan dan Pemantauan Sistem Pendingin Minyak Lumas:

1. Alat Diagnostik dan Pemantauan Kondisi (*Condition Monitoring Tools*)
 - a. *Infrared Thermometer (Temp Gun)*: Untuk mengukur perbedaan suhu (ΔT) antara inlet dan outlet *lube oil cooler* serta *sea water cooler* secara *spot-check*, mendeteksi penyumbatan atau ketidakefisienan.
 - b. *Portable Vibration Meter*: Untuk memantau tingkat getaran pada pompa sirkulasi minyak lumas dan pompa air laut, yang dapat ketidaksejajaran, ketidakseimbangan, atau keausan bantalan.
 - c. *Digital Pressure Gauge (Portable)*: Untuk mengkalibrasi atau memverifikasi pembacaan tekanan dari sensor yang terpasang tetap pada sistem minyak lumas dan air laut.
2. Alat Khusus untuk Perawatan *Lube oil Cooler*
 - a. *Tube Cleaning Kit (Rodding Gun dan Tube Brushes)*: Perangkat khusus untuk pembersihan mekanis *tube cooler*, termasuk brush dengan diameter dan material (baja/kawat nylon) yang sesuai untuk ukuran dan material *tube*.
 - b. *Chemical Cleaning Pump and Circulation Kit*: Pompa portabel dan wadah untuk melakukan sirkulasi larutan pembersih kimia (*acidic* atau *alkaline cleaner*) melalui sisi air atau minyak pada *cooler*.
 - c. *Tube Expansion Tool (Tube Expander)* dan *Tube Rolling Kit*: Alat untuk memperbaiki atau mengganti seal pada ujung *tube (tube end)* di *tube sheet* jika ditemukan kebocoran.
 - d. *Hydraulic Pressure Test Pump and Adapters*: Kit untuk melakukan uji tekanan (*pressure test*) pada *cooler* setelah perakitan, guna memastikan tidak ada kebocoran internal atau eksternal.
3. Alat Tangan (*Hand Tools*) dan Perlengkapan Umum
 - a. *Correct Sized Spanners, Socket Sets, and Torque*

Wrench: Kunci dengan ukuran dan torsi yang tepat untuk pembongkaran dan perakitan flens, penutup (*end covers*), dan komponen lainnya sesuai spesifikasi pabrikan.

- b. *Soft Face Hammer (Mallet) dan Drift Pins*: Untuk membantu proses pembongkaran komponen tanpa merusak permukaan.
 - c. *Dial Gauge (Indicator)* Untuk memeriksa alignment kopleng pompa dan celah (*clearances*) mekanis jika diperlukan.
 - d. *Ultrasonic Thickness Gauge*: Untuk mengukur ketebalan dinding tube atau shell cooler secara berkala guna memantau laju korosi.
4. Alat Keselamatan Kerja (*Personal Protective Equipment - PPE*) yang Spesifik
- a. *Heat-Resistant Gloves dan Face Shield*: Untuk melindungi dari permukaan panas dan cipratan bahan kimia selama pekerjaan.
 - b. *Chemical Goggles dan Respirator/Apron*: Saat menangani bahan kimia pembersih (*chemical cleaning*).
 - c. *High-Quality Hearing Protection (Ear Muffs)*: Mengingat lingkungan kerja yang bising di sekitar mesin induk.

D. Faktor Kapal

Efektivitas program perawatan (*maintenance programme*) yang diterapkan untuk sistem pendingin dan ketersediaan suku cadang (*spare parts*) yang penting. Sistem mesin, termasuk *lube oil cooler*, memerlukan siklus perawatan yang terencana, proaktif, dan didasarkan pada kondisi (*condition-based*). Program yang hanya bersifat reaktif, yaitu memperbaiki setelah rusak (*breakdown maintenance*), atau program terencana yang tidak didasarkan pada rekomendasi pabrikan dan kondisi operasional aktual, akan menyebabkan degradasi komponen yang tidak terpantau. Sebagai contoh, jika interval pembersihan *cooler* ditetapkan secara arbitrer setiap 12 bulan tanpa mempertimbangkan kualitas air laut di rute pelayaran atau beban mesin, maka *fouling* yang parah mungkin telah terjadi jauh sebelum

jadwal pembersihan tiba, menyebabkan insiden *overheat*. Penelitian oleh Akyuz et al. (2021: 172) menyimpulkan bahwa ketidaktepatan interval perawatan merupakan salah satu penyebab utama kegagalan prematur peralatan mesin kapal.

Regulasi internasional menempatkan tanggung jawab perawatan kapal secara jelas pada perusahaan melalui *International Safety Management (ISM) Code*. ISM Code, Bagian 10 (Pemeliharaan Kapal dan Perlengkapannya), secara tegas mewajibkan perusahaan untuk menetapkan prosedur untuk memastikan kapal dipelihara sesuai dengan peraturan yang relevan dan standar yang dianjurkan oleh organisasi, badan klasifikasi, dan pabrik pembuat. Perusahaan harus menjamin bahwa inspeksi, survei, audit, dan verifikasi terkait pemeliharaan ini dilaksanakan. Ini berarti perusahaan tidak boleh hanya memiliki jadwal perawatan (*planned maintenance system - PMS*), tetapi juga harus memastikan bahwa PMS tersebut sesuai (*conform*) dengan standar, dilaksanakan, dan keefektifannya ditinjau secara berkala. *Safety Management System (SMS)* perusahaan adalah dokumen hukum yang wajib mendokumentasikan dan menjalankan komitmen ini.

Jadwal dan Langkah Perawatan Sistem Pendingin Minyak Lumas yang Harus Dilaksanakan Kru:

1. Perawatan Harian

- a. Pemeriksaan dan Pencatatan: Memeriksa dan mencatat suhu minyak lumas masuk/keluar *cooler* serta perbedaan tekanan (*differential pressure*) pada buku catatan harian atau sistem digital. Membandingkan nilainya dengan angka acuan normal.
- b. Inspeksi Visual: Pemeriksaan visual cepat untuk mendeteksi kebocoran minyak atau air di sekitar *lube oil cooler*, pompa, dan jaringan pipanya.
- c. Pemeriksaan Saringan (*Strainer*) Kotak Laut (*Sea Chest*): Memeriksa indikator penyumbatan atau membuka dan membersihkan *strainer* air laut utama jika diperlukan.

2. Perawatan Mingguan

- a. Analisis Tren Kinerja *Cooler*: Menganalisis tren data suhu dan perbedaan tekanan selama seminggu untuk mendeteksi penurunan efisiensi yang terjadi secara perlahan.
- b. Pemeriksaan dengan Termometer Inframerah Portabel: Menggunakan *infrared thermometer* untuk memverifikasi pembacaan suhu dari sensor tetap dan memeriksa distribusi panas pada badan (*shell*) *cooler*.
- c. Pemeriksaan Getaran: Merasakan atau menggunakan alat ukur getaran portabel untuk memeriksa getaran tidak normal pada pompa sirkulasi minyak lumas dan air laut.

3. Perawatan Bulanan atau Berdasarkan Jam Operasi

- a. Analisis Kimia Minyak Lumas: Mengambil sampel minyak lumas dan mengirimkannya ke laboratorium untuk dianalisis guna mendeteksi kontaminasi air, pencampuran bahan bakar (*fuel dilution*), dan tingkat penurunan kualitas.
- b. Uji Fungsi Katup Termostatik (*Thermostatic Valve*): Menguji fungsi katup termostatik dengan memanaskan sensornya secara manual atau memantau respons suhu terhadap perubahan beban mesin.
- c. Pembersihan Saringan (*Strainer*) Sisi Air Laut: Membongkar dan membersihkan secara fisik semua *strainer* sekunder pada sistem air laut pendingin.

4. Perawatan Tahunan atau Setiap 4000-8000 Jam Operasi

- a. Isolasi dan Pembongkaran *Cooler*: Mengisolasi *cooler* dari sistem, membongkar penutup ujung (*end covers*), dan menarik keluar *tube bundle* (untuk tipe *shell and tube*).
- b. Pembersihan Mekanis (*Rodding*): Membersihkan setiap tabung (*tube*) dengan *rodding gun* dan sikat tabung (*tube brush*) yang sesuai ukuran hingga bersih dari kerak dan kotoran.
- c. Pembersihan Kimia (Jika Diperlukan): Melakukan sirkulasi larutan pembersih kimia (misalnya pembersih kerak asam) jika

ditemukan endapan keras yang tidak dapat dibersihkan secara mekanis.

- d. Inspeksi dan Uji Tekan: Memeriksa tabung apakah ada erosi atau korosi, mengganti paking (*gasket*), dan melakukan uji tekan hidrolik pada sisi minyak dan sisi air sebelum perakitan kembali.
 - e. Perakitan Ulang dan Pengoperasian Kembali: Merakit kembali *cooler* dengan paking baru, menghilangkan gelembung udara (*air lock*), dan mengoperasikannya kembali sambil memantau dengan ketat parameter awalnya.
5. Perawatan Berdasarkan Kondisi (*Condition-Based Maintenance*)
- a. Tindakan atas Tren Peringatan: Segera menjadwalkan investigasi dan pembersihan jika perbedaan tekanan (*differential pressure*) melebihi batas yang ditetapkan pabrik atau jika suhu keluaran menunjukkan tren kenaikan yang konsisten.
 - b. Tindakan atas Laporan Analisis Minyak: Melakukan pembersihan sistem dan investigasi penyebab jika laporan analisis minyak menunjukkan kontaminasi air atau partikel logam yang tidak normal.
 - c. Perawatan Pascainsiden: Setiap terjadi alarm suhu tinggi, *cooler* yang terkait harus dijadwalkan untuk dibongkar dan diperiksa pada kesempatan paling awal, terlepas dari jadwal rutusnya.

E. Faktor Manajemen Perusahaan Pelayaran

Regulasi internasional telah menjadikan komitmen manajemen ini sebagai landasan hukum yang wajib. *International Safety Management (ISM) Code*, pada Bagian 2 (Kebijakan Keselamatan), secara eksplisit mewajibkan perusahaan untuk menetapkan sebuah kebijakan keselamatan yang mencakup, antara lain, komitmen untuk mencapai tingkat pencegahan kecelakaan dan pencemaran tertinggi. Kebijakan ini harus didokumentasikan, dilaksanakan, dipelihara, dan dikomunikasikan kepada seluruh personel. Lebih lanjut, Bagian 1.4 ISM

Code mewajibkan perusahaan untuk memberikan sumber daya dan dukungan yang diperlukan bagi orang-orang di darat dan di kapal untuk melaksanakan kebijakan tersebut. Hal ini berarti perusahaan harus mengalokasikan anggaran untuk suku cadang, alat kerja yang tepat, pelatihan berkelanjutan, dan waktu yang cukup bagi awak kapal untuk melaksanakan pemeliharaan dengan benar, tanpa ancaman sanksi karena keterlambatan jadwal. Kepatuhan terhadap ISM Code adalah mandatori dan diverifikasi melalui sertifikasi *Document of Compliance (DOC)* untuk perusahaan dan *Safety Management Certificate (SMC)* untuk setiap kapal.

Komitmen ini diuji ketika terjadi konflik antara keselamatan dan tekanan operasional. Misalnya, jika sebuah *lube oil cooler* menunjukkan gejala penurunan performa melalui tren kenaikan suhu, perawatan yang tepat mungkin memerlukan kapal untuk berhenti di pelabuhan terdekat atau mengurangi kecepatan untuk waktu tertentu. Keputusan akhir sering kali memerlukan persetujuan dari manajemen darat. Jika budaya perusahaan tidak mendukung keputusan yang berorientasi keselamatan dalam situasi seperti ini, dan lebih mementingkan ketepatan waktu (*schedule adherence*), maka kru kapal mungkin akan didorong untuk terus beroperasi dengan sistem yang memburuk. Perilaku ini merupakan pelanggaran langsung terhadap prinsip ISM Code yang menuntut identifikasi risiko dan penerapan tindakan pencegahan. Oleh karena itu, regulator seperti otoritas pelabuhan (*Port State Control - PSC*) akan memeriksa tidak hanya dokumen, tetapi juga bukti penerapan SMS, termasuk bagaimana perusahaan menangani laporan ketidaksesuaian (*non-conformity reports*) dan insiden dari kapal.

Dalam konteks pencegahan kegagalan sistem pendingin, komitmen manajemen diterjemahkan ke dalam keputusan anggaran. Penyediaan *critical spares* seperti *tube bundle* cadangan atau *tube cleaning kit* yang lengkap memerlukan investasi modal. Demikian pula, program pelatihan lanjutan untuk perwira mesin tentang *condition*

monitoring dan analisis akar penyebab (*root cause analysis*) memerlukan biaya dan waktu. Jika manajemen menganggap pengeluaran ini sebagai biaya dan bukan investasi dalam keandalan (*reliability*), maka kapal akan beroperasi dengan sumber daya yang minimal, meningkatkan kerentanan terhadap insiden. Studi oleh Ventikos et al. (2023: 155) menunjukkan bahwa perusahaan dengan tingkat investasi di atas rata-rata dalam pelatihan dan peralatan pemeliharaan memiliki insiden kegagalan mesin utama yang 40% lebih rendah.

Dengan demikian, efektivitas semua prosedur di kapal sangat bergantung pada pondasi yang dibangun oleh manajemen di darat. Sebuah *Safety Management System (SMS)* yang hanya "ada di atas kertas" (*paperwork exercise*) tidak akan mampu mencegah insiden teknis yang berulang. Otoritas bendera (*flag state*) dan PSC harus mengevaluasi komitmen ini tidak hanya dari kelengkapan manual, tetapi juga dari rekam jejak insiden, hasil audit, dan wawancara dengan kru. Jika ditemukan bahwa perusahaan secara konsisten mengabaikan rekomendasi perbaikan dari kapal atau menekan kru untuk melanggar prosedur batas aman (*safe limits*), hal ini dapat mengarah pada penarikan sertifikat DOC dan SMC, yang pada dasarnya menghentikan operasi kapal.

F. Faktor Dari Luar Kapal

Faktor eksternal pertama yang sangat berpengaruh namun sering kali di luar kendali langsung kru dan perusahaan adalah kualitas air laut yang digunakan sebagai media pendingin akhir (*ultimate heat sink*) dalam sistem *lube oil cooler*. Air laut bukanlah media yang murni dan seragam; komposisinya sangat bervariasi tergantung pada lokasi geografis, kedalaman, musim, dan aktivitas antropogenik di wilayah tersebut. Parameter seperti suhu air laut, tingkat kekeruhan (*turbidity*), salinitas, serta kandungan sedimen, plankton, dan polutan organik secara langsung memengaruhi laju *fouling* dan korosi pada sisi

tube cooler. Sebagai contoh, berlayar di perairan tropis dangkal dengan suhu air laut tinggi (di atas 30°C) mengurangi Temperature *gradient* antara minyak lumpur panas dan air pendingin, sehingga menurunkan efisiensi perpindahan panas secara fundamental. Lebih buruk lagi, perairan dengan kandungan nutrisi tinggi (*eutrophic*) atau yang tercemar limbah organik memicu pertumbuhan biologis (*biofouling*) yang cepat di dalam *tube cooler*, seperti kerang, teritip, dan algae, yang dapat menyumbat aliran secara signifikan dalam waktu relatif singkat. Studi oleh Politis et al. (2023: 74) menunjukkan bahwa komposisi biologis dan kimiawi air laut adalah faktor penentu dominan dalam laju penurunan kinerja *heat exchanger* di kapal.

Meskipun kualitas air laut adalah kondisi alamiah, regulasi internasional dan nasional justru dapat memperburuk situasi dengan membatasi metode penanganan *fouling* yang tersedia bagi kapal. Regulasi yang paling relevan adalah *International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships (AFS Convention)*. Konvensi ini melarang penggunaan senyawa tributyltin (TBT) dan memberlakukan pembatasan ketat pada penggunaan *biocide* lainnya dalam cat anti-*fouling* pada lambung kapal. Namun, konvensi ini tidak mengatur perawatan internal sistem pendingin. Implikasi pentingnya adalah bahwa pilihan untuk mengatasi *biofouling* di dalam *tube cooler* menjadi sangat terbatas. Penggunaan bahan kimia *biocidal* yang kuat untuk pembersihan *in-situ* atau sebagai aditif dalam air laut dapat dilarang oleh peraturan lingkungan setempat ketika kapal membuang air bilas (*cooling water discharge*) di pelabuhan, karena dianggap sebagai sumber pencemaran. Dengan demikian, kapal sering kali hanya dapat mengandalkan pembersihan mekanis (*mechanical rodding*) yang mungkin kurang efektif untuk *biofouling* yang kuat, atau harus menunggu hingga kapal berada di lokasi yang diizinkan untuk melakukan *chemical cleaning*.

Selain itu, *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*, terutama Annex IV (Peraturan untuk

Pencegahan Pencemaran oleh Limbah Cair dari Kapal) dan Annex V (Peraturan untuk Pencegahan Pencemaran oleh Sampah dari Kapal), juga dapat memengaruhi praktik perawatan. Endapan atau kotoran yang dikeluarkan dari pembersihan *cooler* harus dibuang dengan cara yang sesuai agar tidak melanggar aturan MARPOL mengenai pembuangan sampah dan residu ke laut. Keterbatasan ini dapat mendorong praktik penundaan pembersihan hingga kapal mencapai fasilitas penerimaan (*reception facilities*) di pelabuhan, yang memungkinkan endapan *fouling* terus menumpuk dan semakin mengurangi efisiensi pendinginan. Oleh karena itu, perusahaan dan kru harus memiliki prosedur yang jelas dalam *Safety Management System (SMS)* mereka, sesuai dengan ISM Code, untuk menangani perawatan sistem pendingin dengan mematuhi semua konvensi lingkungan ini, yang menambah lapisan kompleksitas operasional.