



Optimasi Inspeksi *Turbocharger* MET 42 SD dengan *Risk-Based Inspection* dan *Condition-Based Maintenance*

Moh Aghib¹, Surya Hariyanto^{1,*}

¹ Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, Indonesia

Kata kunci

Turbocharger MET 42 SD
Risk Based Inspection
Condition Based Maintenance
API 581
ISO 10816-3

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan interval inspeksi *turbocharger* MET 42 SD pada MT. GERALDINE dengan mengintegrasikan metode *Risk Based Inspection* (RBI) dan *Condition Based Maintenance* (CBM) kualitatif. Meskipun penelitian sebelumnya telah membahas RBI pada sistem perpipaan dan *pressure vessel*, penerapan RBI-CBM secara terintegrasi pada *turbocharger* kapal niaga dengan keterbatasan data getaran *real-time* masih sangat terbatas. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menawarkan kerangka kerja adaptif berbasis data monitoring kapal dan penilaian kru berpengalaman. Data dikumpulkan melalui dokumen monitoring kapal dan kuesioner kru kapal. Hasil penelitian menunjukkan: (1) kondisi *bearing* “Aus Ringan” dengan *axial clearance* 0,15 mm; (2) nilai getaran 15–20 mm/s berada pada zona “Unacceptable” menurut ISO 10816-3; (3) tekanan *scavenge* turun 69% saat *surging*; dan (4) *dynamic balancing* memerlukan kalibrasi ulang. Berdasarkan adaptasi prinsip API 581, Probability of Failure (PoF) = 0,60 dan Consequence of Failure (CoF) = 0,86 menghasilkan tingkat risiko sedang-tinggi (0,516). Penelitian ini merekomendasikan pemangkasan interval inspeksi: inspeksi visual dan oli menjadi 1.000 jam, pengukuran getaran menjadi 1.500 jam, dan *overhaul* menjadi 6.000 jam.

* **Corresponding author:**

Moh Aghib (email: aghibm2@gmail.com)

Diterima: 26 Mei 2026

Disetujui: 15 Juni 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

1 Pendahuluan

Turbocharger adalah pesawat bantu pada motor diesel kapal yang menggunakan energi gas buang untuk meningkatkan massa udara yang masuk ke dalam silinder. Gas buang memutar sudu turbin pada sisi turbin (*turbine side*), yang terhubung langsung dengan impeler kompresor pada sisi pengeluar (*blower side*). Kompresor mengisap udara luar, memampatkannya, kemudian mengalirkannya melalui *intercooler* untuk didinginkan sebelum disalurkan ke dalam silinder guna meningkatkan massa oksigen dan efisiensi pembakaran [1].

Pada armada tanker seperti MT. GERALDINE yang digerakkan oleh motor induk STX MAN B&W 6S35MC-7 dengan dukungan *turbocharger* tipe MET 42 SD, efisiensi bahan bakar dan keandalan operasional sangat bergantung pada stabilitas performa sistem induksi paksa tersebut. Berdasarkan observasi empiris selama praktik laut, anomali pada *turbocharger* terbukti memicu serangkaian efek kaskade. Penurunan efisiensi kompresi udara bilas menyebabkan tekanan udara bilas turun sehingga proses pembakaran di dalam silinder menjadi tidak optimal. Kondisi ini secara langsung menurunkan performa mesin induk, yang pada gilirannya berdampak pada degradasi daya generator serta gangguan operasional pada alternator dan mengancam keandalan serta keselamatan operasi kapal secara keseluruhan. Penurunan kinerja yang diakibatkan oleh keausan bantalan (*bearing*) dan ketidakseimbangan rotor (*rotor unbalance*) tidak hanya menurunkan tekanan udara bilas serta meningkatkan konsumsi bahan bakar, tetapi juga berisiko menimbulkan kegagalan katastropik yang mengancam keselamatan pelayaran dan efisiensi armada. Studi terdahulu oleh Ashari et al. (2025) menegaskan bahwa degradasi kualitas minyak pelumas, keausan *sealing bush*, serta penyumbatan pada saluran pompa oli merupakan deviasi teknis utama yang melandasi kerusakan *bearing* pada *turbocharger* [2].

Di sisi lain, implementasi manajemen perawatan konvensional berbasis waktu (*Time Based Maintenance*) dinilai kurang efektif karena tidak mempertimbangkan kondisi aktual komponen, seperti nilai getaran yang tinggi, kejadian *surging*, perubahan *axial clearance bearing*, maupun kebutuhan prioritas inspeksi berbasis risiko. Interval perawatan yang ditetapkan secara seragam berdasarkan waktu semata berpotensi terlambat mendeteksi degradasi komponen yang berlangsung lebih cepat daripada jadwal yang ditetapkan [4][5]. Selaras dengan pandangan Oropallo et al. (2024), sektor industri maritim modern memerlukan transformasi menuju strategi pemeliharaan yang lebih adaptif. Dalam konteks ini, *Risk Based Inspection* (RBI) hadir sebagai salah satu metodologi mutakhir yang direkomendasikan untuk mengevaluasi risiko integritas komponen [6]. Merujuk pada standar API 581, formulasi risiko secara matematis dihitung sebagai hasil perkalian antara peluang kegagalan (*probability of failure*) dan konsekuensi dampak kegagalan (*consequence of failure*) [7].

Di sisi lain, penerapan *Condition Based Maintenance* (CBM) melalui analisis vibrasi menawarkan kemampuan untuk mendeteksi secara dini gejala keausan pada *bearing* serta anomali ketidakseimbangan (*unbalance*) pada rotor. Dalam mengevaluasi tingkat keparahan getaran pada permesinan industri dengan kapasitas daya di atas 15 kW, standar ISO 10816-3 menetapkan bahwa magnitudo vibrasi yang melampaui ambang batas 7,1 mm/s dikategorikan ke dalam zona tidak dapat diterima (*unacceptable*) [8].

Walaupun beberapa studi terdahulu mengkaji implementasi RBI pada sistem perpipaan, bejana tekan (*pressure vessel*), maupun komponen statis pada instalasi kapal [6][7], kajian yang secara khusus mengintegrasikan RBI dan CBM pada *turbocharger* kapal niaga masih sangat terbatas, khususnya dalam kondisi keterbatasan data getaran *real-time*. Kebaruan penelitian ini terletak pada adaptasi RBI dan CBM semikuantitatif yang dirancang tetap aplikatif meskipun data getaran *real-time* dan database failure rate industri tidak tersedia, dengan memanfaatkan kombinasi data monitoring kapal dan *expert judgment* kru berpengalaman. Sebagai gambaran, Sarifuddin dan Sinaga (2025) telah mengulas optimasi kinerja *turbocharger* dalam kerangka *total productive maintenance* (TPM), tetapi belum mengombinasikannya dengan penilaian risiko kuantitatif [9]. Sementara itu, Lao et al. (2025) berfokus pada evaluasi korelasi antara performa *turbocharger* dan output daya motor induk, tetapi mengabaikan urgensi aspek strategis pemeliharaan berbasis risiko [10].

Guna mengisi celah penelitian (*research gap*) tersebut, studi ini mengusulkan kerangka kerja adaptif yang mengintegrasikan metode RBI dan CBM, meskipun dihadapkan pada keterbatasan data getaran *real-time*. Secara garis besar, kerangka kerja adaptif yang diusulkan mencakup lima komponen utama yaitu: (1) penilaian PoF berbasis skala semi-kuantitatif, (2) penilaian CoF dengan pembobotan hierarki risiko, (3) klasifikasi kondisi getaran mengacu pada standar ISO 10816-3, (4) penentuan faktor koreksi f_{risk} dan $f_{condition}$ sebagai faktor penyesuaian praktis berbasis PMS kapal, serta (5) perhitungan interval inspeksi optimal T_{Opt} yang dapat langsung diintegrasikan ke dalam jadwal perawatan kapal. Secara spesifik, penelitian ini diorientasikan untuk memenuhi tiga tujuan utama, antara lain: (1) mengalkulasi tingkat risiko pada *turbocharger* MET 42 SD melalui adaptasi formulasi RBI berdasarkan standar API 581; (2) mengevaluasi karakteristik dan kondisi getaran sistem merujuk pada regulasi ISO 10816-3; serta (3) merumuskan interval inspeksi optimal yang mensinergikan keluaran analisis RBI dan pendekatan CBM kualitatif.

2 Metode Penelitian

Lokasi penelitian bertempat di kapal tanker rute domestik, MT. GERALDINE, dengan waktu pelaksanaan pengumpulan dan analisis data pada April sampai Mei 2026. Data historis yang digunakan mencakup laporan monitoring *turbocharger* sejak *overhaul* terakhir (Desember 2025) hingga periode penelitian, termasuk catatan kejadian operasional yang relevan, seperti peristiwa *surging*. Objek spesifik yang dievaluasi adalah sistem *turbocharger* MET 42 SD pada motor induk STX MAN B&W 6S35MC-7.

a. Metode Pengumpulan Data

Guna mendukung analisis, metodologi pengumpulan data dirancang secara hibrida dengan mengombinasikan data operasional lapangan dan penilaian ahli. Pendekatan pertama dilakukan melalui ekstraksi data dari laporan pemantauan berkala (monitoring *turbocharger* main engine), yang mengonfirmasi aspek teknis seperti dinamika getaran, celah kelonggaran *bearing*, dan parameter kinerja mesin. Pendekatan kedua mengandalkan data primer berbasis kuesioner yang diisi oleh personel kunci kamar mesin, yaitu chief engineer dan masinis I. Instrumen ini difokuskan untuk mengevaluasi rekam jejak frekuensi kerusakan komponen, justifikasi visual kondisi *bearing* sewaktu pembongkaran (*overhaul*), serta identifikasi penyebab kerusakan berdasarkan pengalaman empiris kru. Setiap jawaban responden selanjutnya dipetakan ke dalam rubrik 1–5 yang telah ditetapkan pada tabel penilaian PoF dan CoF. Untuk memastikan konsistensi penilaian, skor akhir yang

digunakan merupakan hasil verifikasi silang antara jawaban kuesioner kru dan data dokumen monitoring kapal sehingga setiap skor yang ditetapkan memiliki dasar empiris yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 1. Data operasional *turbocharger* MET 42 SD

Parameter	Nilai	Satuan
Total <i>running hours</i>	71.839,3	jam
Running hours sejak <i>overhaul</i> terakhir	1.536,7	jam
Axial clearance <i>bearing</i> (L1)	0,15	mm
Standar pabrik axial clearance	0,13–0,18	mm
Putaran <i>turbocharger</i>	16.700	RPM
Beban mesin induk	75	%
Tekanan <i>scavenge</i> normal	2,6	bar
Tekanan <i>scavenge</i> saat <i>surging</i>	0,8	bar

b. Keterbatasan Data dan Pendekatan Adaptif

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Condition Based Maintenance* (CBM) kualitatif yang mengandalkan rekam jejak monitoring operasional kapal serta penilaian ahli (*expert judgment*) dari kru berpengalaman. Langkah metodologis ini diambil sebagai solusi atas keterbatasan akses instrumentasi pengukuran vibrasi secara *real-time* serta ketiadaan basis data tingkat kegagalan (*failure rate database*) industri maritim yang umumnya dipersyaratkan dalam implementasi penuh prosedur API 581. Strategi ini selaras dengan konsep *expert-based CBM* yang telah diakui dan divalidasi dalam berbagai literatur ilmiah [4][11]. Khusus untuk penentuan nilai *probability of failure* (PoF), penelitian ini mengadaptasi pendekatan semikuantitatif menggunakan skala Likert 1–5 yang kemudian dikonversi ke dalam rentang nilai 0–1, alih-alih mengadopsi parameter generic failure frequency dari standardisasi API 581. Kendala ketersediaan data ini diakui secara terbuka sebagai batasan dalam penelitian ini (*research limitation*). Kendati demikian, keterbatasan tersebut membatasi presisi kuantitatif hasil perhitungan. Kerangka kerja yang diusulkan tetap relevan sebagai pendekatan awal berbasis kondisi aktual komponen dan penilaian ahli, serta dapat menjadi landasan bagi penelitian lanjutan dengan data yang lebih lengkap.

c. Perhitungan Probability of Failure (PoF)

Penentuan nilai PoF dilakukan melalui pendekatan semikuantitatif yang mengadaptasi prinsip dasar standar API 581. Metodologi ini menerapkan skala Likert dengan rentang skor 1 hingga 5 untuk mengevaluasi empat parameter penentu utama. Guna menjamin akuntabilitas serta memungkinkan replikasi dan verifikasi data dalam penelitian mendatang, setiap kriteria penilaian dilengkapi dengan rubrik skor operasional yang eksplisit (Tabel 2). Selanjutnya, akumulasi skor total dari seluruh parameter dikonversi ke dalam skala indeks berbobot antara 0 hingga 1 menggunakan rumus berikut:

$$PoF = \frac{(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)}{(n \times 5)} \quad (1)$$

Keterangan: F1–F4 adalah skor setiap faktor

n = jumlah faktor (n = 4)

Tabel 2. Faktor penentu Probability of Failure (PoF)

Faktor	Skala skor (1–5)	Data MT. GERALDINE	Skor
--------	------------------	-----------------------	------

Frekuensi kerusakan <i>bearing</i>	1 = Tidak pernah (2–5 tahun sekali), 3 = 2–3 tahun sekali, 4 = Tiap tahun, 5 = <1 tahun	2–3 tahun sekali	3
Jam operasi sejak <i>overhaul</i>	1 = <10%, 2 = 10–30%, 3 = 30–60%, 4 = 60–90%, 5 = >90% dari siklus <i>overhaul</i> (1.537/9.000 = 17%)	1.537 jam (17% siklus)	2
Kondisi <i>bearing</i> saat <i>overhaul</i>	1 = Sempurna, 2 = Baik, 3 = Aus ringan/mendekati batas, 4 = Aus sedang, 5 = Rusak/scoring	Aus ringan, clearance 0,15 mm	3
Indikasi kegagalan lain	1 = Tidak ada, 2 = Anomali kecil, 3 = 1 indikasi terverifikasi, 4 = 2+ indikasi jelas, 5 = Kegagalan aktif	Surging + balancing perlu kalibrasi ulang	4
Total skor		12	–

Substitusi data MT. GERALDINE:

$$PoF = \frac{(3 + 2 + 3 + 4)}{(20 \times 5)} = \frac{12}{20} = 0,6$$

d. Perhitungan Consequence of Failure (CoF)

CoF dinilai dari empat aspek dengan bobot yang merupakan adaptasi peneliti berdasarkan prioritas risiko operasional kapal tanker, menggunakan prinsip hierarki IMO ISM Code 2018 dan ALARP sebagai kerangka acuan konseptual, bukan sebagai penetapan angka baku. Bobot keselamatan ditetapkan paling tinggi (0,30) karena kegagalan mesin induk di perairan berpotensi langsung mengancam jiwa awak kapal dan keselamatan muatan. Bobot finansial dan operasional masing-masing sebesar 0,25 karena kerugian *off-hire* kapal tanker niaga sangat signifikan dan keduanya berdampak langsung pada keberlangsungan operasi. Bobot lingkungan ditetapkan terendah (0,20) karena dampak emisi *turbocharger* bersifat tidak langsung dan masih dapat dimitigasi melalui tindakan korektif. Total bobot = 1,00. CoF dihitung dengan rumus berikut:

$$CoF = \frac{\sum(S_i \times W_i)}{S_{Max}} \quad (2)$$

Keterangan: S_i = skor aspek ke- i

W_i = bobot aspek ke- i

S_{max} = 5 (skor maksimal)

Tabel 3. Perhitungan Consequence of Failure (CoF) *turbocharger* MET 42 SD

Aspek	Skala skor (1–5)	Skor	Bobot	Dasar bobot	Skor × bobot
Finansial	1 = Tidak ada biaya tambahan, 3 = Biaya perbaikan sedang, 5 = Off-hire + perbaikan darurat sangat mahal	4	0,25	IMO ISM	1,00
Operasional	1 = Tidak terganggu, 3 = Penurunan daya parsial, 5 = Kapal tidak dapat beroperasi	4	0,25	IMO ISM	1,00
Keselamatan (tertinggi)	1 = Tidak ada risiko jiwa, 3 = Potensi luka, 5 = Potensi korban jiwa/kapal tidak terkendali	5	0,30	ALARP	1,50

Lingkungan	1 = Tidak ada dampak, 3 = Dampak lokal terbatas, 5 = Pencemaran besar/pelanggaran MARPOL	4	0,20	MARPOL	0,80
	Jumlah	–	1,00	–	4,30

Substitusi data CoF:

$$CoF = \frac{\sum(4 \times 0,25 + 4 \times 0,25 + 5 \times 0,30 + 4 \times 0,20)}{5} = \frac{4,30}{5} = 0,86$$

e. Perhitungan Risiko dan Optimasi Interval Inspeksi

Risiko dihitung dengan mengalikan PoF dan CoF sesuai prinsip API 581 [7]:

$$Risk = PoF \times CoF \quad (3)$$

Substitusi hasil *PoF* dan *CoF*:

$$Risk = 0,6 \times 0,86 = 0,516$$

Nilai risiko 0,516 diklasifikasikan dalam lima zona berdasarkan distribusi linier skala 0–1: sangat rendah (0–0,20), rendah (0,21–0,36), sedang-tinggi (0,37–0,64), tinggi (0,65–0,81), dan sangat tinggi (0,82–1,00). Nilai 0,516 berada di zona sedang-tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada *risk matrix* Tabel 6.

f. Optimasi Interval Inspeksi

Interval inspeksi optimal (T_{Opt}) dihitung menggunakan rumus:

$$T_{Opt} = T_{base} \times f_{risk} \times f_{condition} \quad (4)$$

Di mana:

T_{base} : interval standar pabrikan

f_{risk} : faktor koreksi risiko diturunkan dari (1-risk level) = $1 - 0,516 = 0,484$, nilai ini selanjutnya disesuaikan menjadi faktor penyesuaian praktis sebesar 0,67 untuk inspeksi visual dan *overhaul*, serta 0,50 untuk pengukuran getaran. Pemilihan nilai 0,67 didasarkan pada pembulatan konservatif ke kelipatan praktis yang selaras dengan siklus PMS kapal (kelipatan 500 jam), sementara nilai 0,50 merupakan keputusan operasional yang lebih ketat mengingat kondisi getaran *turbocharger* berada pada zona D yang kritis.

$f_{condition}$: faktor koreksi kondisi berdasarkan zona ISO 10816-3, di mana zona D (getaran > 7,1 mm/s) dengan nilai 0,75 yang mencerminkan kondisi *turbocharger* yang berada 2,1 x di atas batas minimum zona *unacceptable*.

Pembulatan T_{Opt} ke kelipatan 500 atau 1.000 jam dilakukan untuk menyelaraskan dengan sistem PMS (*Planned Maintenance System*) kapal yang merupakan praktik umum dalam mengelola perawatan kapal tanker

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengumpulan Data

Berdasarkan data monitoring, total *running hours turbocharger* MET 42 SD tercatat 71.839,3 jam, sedangkan *running hours* sejak *overhaul* terakhir (Desember 2025) sebesar 1.536,7 jam. Kondisi komponen utama disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kondisi komponen *turbocharger* MET 42 SD

Komponen	Kondisi	Keterangan
Bearing	Aus ringan	Axial clearance 0,15 mm—masih dalam batas toleransi pabrik (0,13–0,18 mm)
Rotor shaft	Baik	Tidak ada defleksi

Blading	Baik	Tidak ada erosi atau retak pada sudu turbin dan kompresor
Dynamic balancing	Perlu kalibrasi ulang	Indikasi ketidakseimbangan rotor, berkorelasi dengan nilai getaran zona D ISO 10816-3

Turbocharger MET 42 SD mengalami kondisi *bearing* “Aus Ringan” dengan *axial clearance* 0,15 mm yang masih berada dalam rentang toleransi pabrik (0,13–0,18 mm), tetapi mendekati batas maksimum toleransi. Hasil *dynamic balancing* yang menyatakan “perlu kalibrasi ulang” mengindikasikan ketidakseimbangan rotor yang berhubungan langsung dengan nilai getaran tinggi pada ISO 10816-3.

3.2 Analisis Getaran Berdasarkan ISO 10816-3

Data getaran dari monitoring menunjukkan nilai normal 15 mm/s dan nilai maksimum 20 mm/s pada sisi kompresor (*compressor side*). Berdasarkan ISO 10816-3 untuk mesin dengan daya di atas 15 kW, klasifikasi zona getaran ditampilkan pada Tabel 5. Nilai getaran 15–20 mm/s berada pada zona D “Unacceptable”, yakni sekitar 2,1–2,8 kali di atas ambang batas zona D ($15 \text{ mm/s} \div 7,1 \text{ mm/s} = 2,11$ kali hingga $20 \text{ mm/s} \div 7,1 \text{ mm/s} = 2,82$ kali). Kondisi ini berpotensi membahayakan integritas mesin dalam jangka pendek apabila tidak segera ditangani [8].

Tabel 5. Klasifikasi zona getaran ISO 10816-3 dan status *turbocharger* MET 42 SD

Zona	Batas kecepatan getaran	Deskripsi kondisi	Status <i>turbocharger</i> MET 42 SD
A	< 2,3 mm/s	Kondisi baru, getaran sangat baik	–
B	2,3–4,5 mm/s	Operasi jangka panjang tanpa batas	–
C	4,5–7,1 mm/s	Operasi terbatas, perlu pemantauan	–
D	> 7,1 mm/s	Unacceptable, potensi kerusakan serius	15–20 mm/s (2,1× batas zona D)

Nilai getaran yang tinggi pada *turbocharger* mengindikasikan kemungkinan ketidakseimbangan rotor (*dynamic unbalancing*), yang konsisten dengan temuan pada data monitoring *overhaul*. Wahid et al. (2022) menunjukkan bahwa penerapan metode analisis kegagalan berbasis prioritas, seperti FMEA, mendukung prinsip prioritas risiko pada komponen berputar, khususnya dalam mendeteksi potensi degradasi *bearing* dan komponen berputar secara dini [12]. Merujuk pada prinsip tersebut, kondisi *bearing* dan rotor *turbocharger* MET 42 SD yang ditunjukkan oleh nilai getaran tinggi serta temuan *axial clearance* yang mendekati batas toleransi mengindikasikan perlunya prioritas inspeksi yang lebih ketat, meskipun konfirmasi definitif memerlukan pengukuran diagnostik lanjutan. Sejalan dengan itu, Randall (2011) menyatakan bahwa nilai getaran yang berada pada zona Unacceptable mengindikasikan potensi kegagalan fatigue pada *bearing* dan blading dalam jangka pendek [11]. Selain itu, *surgings* yang terjadi pada 3 April 2026 menyebabkan tekanan *scavenge* turun drastis dari 2,6 bar menjadi 0,8 bar (penurunan sekitar 69%), yang mengakibatkan pembakaran tidak sempurna dan peningkatan konsumsi bahan bakar [1].

3.3 Hasil Perhitungan RBI dan Risk Matrix

Berdasarkan perhitungan pada metodologi, PoF = 0,60 (sedang-tinggi) dan CoF = 0,86 (tinggi). Nilai *risk matrix* adalah:

$$\text{Risk} = 0,6 \times 0,86 = 0,516$$

Risk matrix pada Tabel 6 memvisualisasikan posisi risiko *turbocharger* MET 42 SD (ditandai tebal) pada perpotongan PoF sedang-tinggi (0,60) dan CoF sangat tinggi (0,86), yang menghasilkan zona risiko sedang-tinggi (Risk = 0,516). Nilai ini menunjukkan bahwa interval inspeksi standar pabrikan perlu dipersingkat secara proporsional berdasarkan kombinasi nilai risiko (Risk = 0,516) dan kondisi getaran yang berada pada zona D ISO 10816-3.

Tabel 6. Risk matrix *turbocharger* MET 42 SD

PoF \ CoF	Sangat rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat tinggi
Sangat tinggi	Sedang	Sedang-tinggi	Tinggi	Tinggi	Sangat tinggi
Tinggi	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang-tinggi	Tinggi
Sedang	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang-tinggi
Rendah	Sangat rendah	Sangat rendah	Rendah	Rendah	Sedang
Sangat rendah	Sangat rendah	Sangat rendah	Sangat rendah	Rendah	Rendah

3.4 Rekomendasi Interval Inspeksi Optimal

Dengan menggunakan rumus (4) dan nilai f_{risk} serta $f_{condition}$ yang telah dijelaskan di metodologi, hasil perhitungan T_{Opt} ditampilkan pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7. Rekomendasi interval inspeksi optimal *turbocharger* MET 42 SD

Jenis inspeksi	T_{base} (jam)	f_{risk}	$f_{condition}$	T_{Opt} (jam)	Keterangan
Inspeksi visual dan oli	1.500	0,67	0,75	$\approx 753,75 \rightarrow 1.000$	Dibulatkan ke kelipatan 500 jam (sesuai PMS kapal)
Pengukuran getaran	3.000	0,50	0,75	$= 1.125 \rightarrow 1.500$	f_{risk} diperketat menjadi 0,50 karena getaran berada di zona D (kritis)
Overhaul <i>turbocharger</i>	9.000	0,67	0,75	$\approx 4.522,5 \rightarrow 6.000$	Dibulatkan ke kelipatan 1.000 jam

Contoh perhitungan T_{Opt} untuk *inspeksi visual* dan oli:

$$T_{Opt} = 1.500 \times 0,67 \times 0,75 = 753,75 \text{ jam}$$

753,75 dibulatkan menjadi 1.000 jam.

Dengan *running hours* sejak *overhaul* saat ini sebesar 1.537 jam dan rata-rata operasi kapal 201,5 jam/bulan (13 jam/hari $\times$ 15,5 hari/bulan), inspeksi pengukuran getaran telah melewati ambang batas 1.500 jam dan perlu dilakukan segera. Rekomendasi interval inspeksi merupakan kontribusi penelitian ini sebagai kerangka kerja perawatan berbasis risiko yang dapat menjadi dasar awal penyesuaian jadwal inspeksi dalam sistem PMS (*Planned Maintenance System*) kapal MT. GERALDINE dan dipertimbangkan dalam penyusunan jadwal inspeksi berbasis risiko pada masa mendatang.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh tiga kesimpulan. Pertama, terjadi keausan *bearing* dengan tingkat kondisi “Aus Ringan” pada *axial clearance* 0,15 mm dan terindikasi ketidakseimbangan rotor berdasarkan nilai getaran 15–20 mm/s yang berada pada zona D (Unacceptable) menurut ISO 10816-3, yaitu 2,1 kali di atas batas 7,1 mm/s. Kondisi tersebut disertai penurunan tekanan *scavenge* sebesar 69% saat *surgin*. Kedua, berdasarkan adaptasi semikuantitatif API 581, diperoleh nilai PoF = 0,60 dan CoF = 0,86 yang menghasilkan tingkat risiko sedang-tinggi dengan Risk = 0,516. Hasil tersebut menunjukkan perlunya peninjauan dan penyesuaian interval inspeksi secara proporsional berdasarkan risiko dan kondisi aktual komponen. Ketiga, interval inspeksi yang disarankan adalah inspeksi visual dan oli setiap 1.000 jam (dari standar 1.500 jam), pengukuran getaran setiap 1.500 jam (dari standar 3.000 jam), dan *overhaul turbocharger* setiap 6.000 jam (dari standar 9.000 jam). Penelitian ini menyediakan kerangka kerja adaptif RBI-CBM yang dapat menjadi acuan awal bagi pengelolaan

inspeksi berbasis risiko pada *turbocharger* MET 42 SD di MT. GERALDINE maupun pada kapal tanker lain dengan karakteristik operasional dan keterbatasan data getaran *real-time* yang serupa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Achmad (Masinis I) dan Bapak Ahmad Subhan (Chief Engineer) MT. GERALDINE yang telah memberikan izin dan bantuan dalam pengumpulan data, serta kepada Bapak Surya Hariyanto selaku dosen pembimbing di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Universitas Hasanuddin atas arahan dan bimbingan selama penelitian berlangsung.

5 Referensi

- [1] D. Sumardiyanto and S. Endah Susilowati, "PENGARUH KONDISI UDARA BILAS TERHADAP KINERJA MESIN DIESEL," Oct. 2017.
- [2] M. Sadeli Ashari *et al.*, "Impression: Jurnal Teknologi dan Informasi Analisis Kerusakan Bearing Turbine Side di Turbocharger Type VTR-160 pada Auxiliary Engine," 2025.
- [3] R. R. Mutra, J. Srinivas, D. M. Reddy, M. N. A. Rani, M. A. Yunus, and Z. Yahya, "Dynamic and stability comparison analysis of the high-speed turbocharger rotor system with and without thrust bearing via machine learning schemes," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 5, p. 316, May 2024, doi: 10.1007/s40430-024-04892-0.
- [4] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," Oct. 2006. doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [5] S. Dhamar Jati, B. Suryo, and D. Lutfiananda, "Rencana Preventive Maintenance CWSM (Cathodewashing Striping Machine) di PT Chiyoda International Indonesia (Plant PT Smelting)," vol. 15, no. 2, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/flywheel/>
- [6] E. Oropallo, P. Piscopo, P. Centobelli, R. Cerchione, E. Nuevo, and A. Rodríguez-Prieto, "A decision support system to assess the operational safety and economic benefits of risk-based inspection implementation strategies," *Saf. Sci.*, vol. 177, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106570.
- [7] "API RP 581: Risk-Based Inspection Methodology," 2016.
- [8] "Kutipan Condition Monitoring dan ISO 10816-3".
- [9] Z. Sinaga, "Optimization of turbocharger performance on MV Mag-nanimous through planned maintenance under the Total Productive Maintenance (TPM) framework," *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 4, 2025, [Online]. Available: <http://ejurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- [10] S. D. Robbi, R. I. A. Lao, M. Darwis, I. A. J. Putri, A. Nugroho, and A. E. Kristiyono, "Analisis Pengaruh Kinerja Turbocharger pada Daya Mesin Induk Pada Kapal LPG/C Cipta Diamond," *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, vol. 4, no. 4, pp. 5455–5462, Dec. 2025, doi: 10.31004/riggs.v4i4.4259.
- [11] R. B. Randall, "Front Matter," in *Vibration-based Condition Monitoring*, Wiley, 2021. doi: 10.1002/9781119477631.fmatter.
- [12] A. Wahid and Y. Suhandini Tjahjaningsih, "Integrasi Failure Tracking Matrix (FTM) dan Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) untuk Perbaikan Sistem Perawatan Mesin Pulverizer," vol. 13, no. 1, pp. 9–20, 2022.