

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**ANALISIS PENGARUH KINERJA *TURBOCHARGER*
TERHADAP DAYA MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C
*CIPTA DIAMOND***



RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO

NIT 09.21.015.1.10

disusun sebagai salah satu syarat
menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana Terapan

POLITEKNIK PELAYARAN SURABAYA
PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PERMESINAN KAPAL
TAHUN 2026

LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN

**ANALISIS PENGARUH KINERJA *TURBOCHARGER*
TERHADAP DAYA MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C
*CIPTA DIAMOND***



RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO

NIT 09.21.015.1.10

disusun sebagai salah satu syarat
menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana Terapan

POLITEKNIK PELAYARAN SURABAYA
PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PERMESINAN KAPAL
TAHUN 2026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO

Nomor Induk Taruna : 09.21.015.1.10

Program Studi : Diploma IV Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal

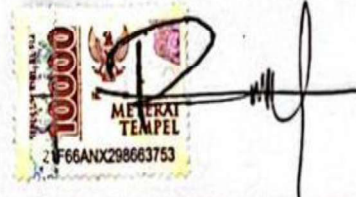
Menyatakan bahwa KIT yang saya tulis dengan judul :

**ANALISIS PENGARUH KINERJA *TURBOCHARGER* TERHADAP DAYA
MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C CIPTA *DIAMOND***

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

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

Surabaya, 29 July 2025



RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO
NIT 09.21.015.1.10

**PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR**

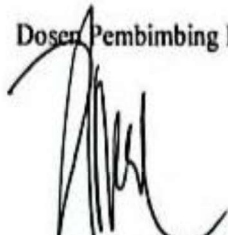
Judul : Analisis Pengaruh Kinerja Turbocharger Terhadap Daya
Mesin Induk Pada Kapal LPG/C Cipta Diamond
Program Studi : Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal
Nama : Richard Imanuel Aldilenz Lao
NIT : 09.21.015.1.10
Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

Dengan ini dinyatakan bahwa telah memenuhi syarat dan disetujui untuk dilaksanakan
Uji Kelayakan Proposal

Surabaya, 16 Oktober 2025

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Muhammad Darwis, ST, M.Mar.E
NIP. 197501271998081001

Dosen Pembimbing II



Dr. Indah Ayu Johanda Putri, SE., M.Ak
NIP. 198609022009122001

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal



Dr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 196905312003121001

**PERSETUJUAN SEMINAR
HASIL TUGAS AKHIR**

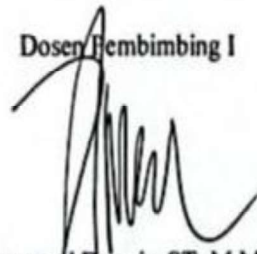
Judul : Analisis Pengaruh Kinerja Turbocharger Terhadap Daya
Mesin Induk Pada Kapal LPG/C Cipta Diamond
Program Studi : Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal
Nama : Richard Imanuel Aldilenz Lao
NIT : 09.21.015.1.10
Jenis Tugas Akhir : Karya Ilmiah Terapan

Dengan ini dinyatakan bahwa telah memenuhi syarat dan disetujui untuk dilaksanakan
Seminar Hasil Tugas Akhir

Surabaya, 29 Oktober 2025

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Muhammad Darwis, ST., M.Mar.E
NIP.197501271998081001

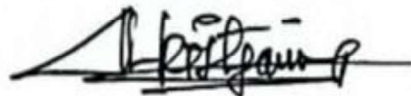
Dosen Pembimbing II



Dr. Indah Ayu Johanda Putri, SE., M.Ak
NIP. 198609022009122001

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal



Dr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 196905312003121001

**PENGESAHAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN**

**ANALISIS PENGARUH KINERJA TURBOCHARGER TERHADAP DAYA
MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C CIPTA DIAMOND**

Disusun oleh:

RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO
NIT. 09.21.015.1.10

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Hasil Tugas Akhir
Politeknik Pelayaran Surabaya

Surabaya, 12 Desember 2025

Mengesahkan,

Dosen Penguji I



Azis Nugroho, SE, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 197503221998081001

Dosen Penguji II



Muhammad Darwis, ST, M.Mar.E
NIP. 197501271998081001

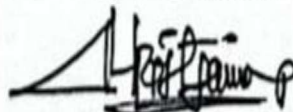
Dosen Penguji III



Dr. Indah Ayu Johanda Putri, SE, M.Ak
NIP. 198609022009122001

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal



Dr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 196905312003121001

**PENGESAHAN
LAPORAN TUGAS AKHIR
KARYA ILMIAH TERAPAN**

**ANALISIS PENGARUH KINERJA TURBOCHARGER TERHADAP DAYA
MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C CIPTA DIAMOND**

Disusun oleh:

RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO
NIT. 09.21.015.1.10

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Hasil Tugas Akhir
Politeknik Pelayaran Surabaya

Surabaya, 17 Desember 2025

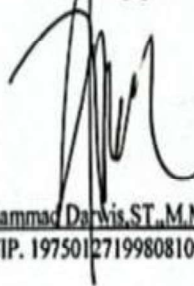
Dosen Penguji I



Azis Nugroho, SE, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 197503221998081001

Mengesahkan,

Dosen Penguji II



Muhammad Darwis, ST., M.Mar.E
NIP. 197501271998081001

Dosen Penguji III



Dr. Indah Ayu Johanda Putri, SE, M.Ak
NIP. 198609022009122001

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal



Dr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd., M.Mar.E
NIP. 196905312003121001

ABSTRAK

RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO, ANALISIS PENGARUH KINERJA *TURBOCHARGER* TERHADAP DAYA MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C CIPTA *DIAMOND*. Dibimbing oleh Bapak Muhammad Darwis, ST, M.Mar.E dan Ibu Dr Indah Ayu Johanda Putri, SE., M.Ak.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kinerja *turbocharger* terhadap daya mesin induk pada kapal LPG/C Cipta *Diamond*. *Turbocharger* berperan penting dalam meningkatkan tekanan udara masuk ke ruang bakar, sehingga berdampak langsung terhadap efisiensi pembakaran dan performa mesin. Penurunan performa *turbocharger* dapat menyebabkan daya mesin menurun, konsumsi bahan bakar meningkat, dan suhu gas buang melebihi batas *aMan*. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif, dengan teknik pengumpulan data berupa observasi langsung, wawancara terstruktur dengan *chief engineer* dan teknisi, serta dokumentasi data log mesin. Analisis data dilakukan menggunakan metode *fishbone* (diagram Ishikawa) untuk mengidentifikasi akar penyebab penurunan performa *turbocharger*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keausan komponen, penumpukan karbon, dan kurangnya perawatan preventif menjadi faktor utama penurunan kinerja *turbocharger*. Oleh karena itu, pemeliharaan berkala dan sistem monitoring tekanan-udara serta temperatur gas buang sangat penting untuk menjaga performa mesin induk tetap optimal.

Kata kunci: *turbocharger*, daya mesin induk, tekanan udara masuk, perawatan, *fishbone*

ABSTRACT

RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO, AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TURBOCHARGER PERFORMANCE ON THE MAIN ENGINE POWER OF LPG/C CIPTA DIAMOND VESSEL. Supervised by Mr. Muhammad Darwis, ST, M.Mar.E and Mrs. Dr Indah Ayu Johanda Putri, SE., M.Ak.

This study aims to analyze the effect of turbocharger performance on the main engine power output of the LPG/C Cipta Diamond vessel. The turbocharger plays a critical role in increasing intake air pressure into the combustion chamber, thereby directly influencing combustion efficiency and engine performance. A decline in turbocharger performance can lead to reduced engine power, increased fuel consumption, and exhaust gas temperatures exceeding safety limits. The research employs a qualitative descriptive approach, using data collection techniques such as direct observation, structured interviews with the chief engineer and technicians, and documentation of engine log data. Data analysis is carried out using the fishbone Method (Ishikawa diagram) to identify the root causes of turbocharger performance degradation. Findings indicate that component wear, carbon buildup, and lack of preventive maintenance are the primary contributors to decreased turbocharger efficiency. Therefore, routine maintenance and a monitoring system for air pressure and exhaust gas temperature are essential to maintain optimal engine performance.

Keywords: *turbocharger, main engine power, intake pressure, maintenance, fishbone*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puja dan puji syukur peneliti panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan anugerah dan kesehatan sehingga peneliti dapat menyelesaikan karya ilmiah terapan ini. Proposal penelitian ini dibuat untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan Program Pendidikan Diploma IV di Politeknik Pelayaran Surabaya, dengan judul penelitian :

“ANALISIS PENGARUH KINERJA *TURBOCHARGER* TERHADAP DAYA MESIN INDUK PADA KAPAL LPG/C CIPTA *DIAMOND*”

Peneliti menyadari bahwa penulisan karya ilmiah terapan ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan waktu, pikiran, kemampuan serta pengalaman peneliti dalam penyusunan karya ilmiah ini. Oleh karena itu peneliti sangat mengharapkan dan berterimakasih apabila ada masukan dari pembimbing, penguji, maupun pembaca lainnya.

Penulisan karya tulis ilmiah ini dapat terselesaikan karena adanya bantuan dari berbagai pihak, olehnya itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Moejiono, M.T., M.Mar.E selaku Direktur Politeknik Pelayaran Surabaya yang telah mendukung saya dalam penulisan proposal ini;
2. Bapak Dr. Antonius Edy Kristiyono, M.Pd., M.Mar.E. selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal;
3. Bapak Muhammad Darwis, ST, M.Mar.E selaku pembimbing I, yang telah membantu serta membimbing saya dalam penulisan proposal ini;
4. Ibu Dr Indah Ayu Johanda Putri, SE., M.Ak selaku pembimbing II, yang dengan penuh ketekunan dan kesabaran membimbing saya dalam penulisan proposal ini;
5. Bapak, Ibu Dosen Politeknik Pelayaran Surabaya yang senantiasa membimbing dan mengarahkan penulis khususnya Jurusan Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal yang telah memberikan bekal ilmu sehingga saya dapat menyelesaikan proposal ini;
6. Kedua orang tua saya yang senantiasa memberikan dukungan dan semangat kepada penulis;
7. Teman-teman yang memberikan semangat dan membantu dalam menyelesaikan proposal ini;

Akhir kata penulis berharap semoga karya ilmiah terapan ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis khususnya dan untuk pihak operasional kapal. Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa memberikan petunjuk dan lindungan dalam melakukan penelitian yang selanjutnya dituangkan dalam bentuk karya ilmiah terapan.

Surabaya, 17 Desember 2025

RICHARD IMANUEL ALDILENZ LAO

NIT 09.21.015.1.10

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
PERSETUJUAN UJI KELAYAKAN	iii
PERSETUJUAN SEMINAR HASIL	iv
PENGESAHAN PROPOSAL	v
PENGESAHAN LAPORAN HASIL.....	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. LATAR BELAKANG	1
B. RUMUSAN MASALAH.....	7
C. TUJUAN PENELITIAN.....	7
D. MANFAAT PENELITIAN.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
A. REVIEW PENELITIAN SEBELUMNYA.....	9
B. LANDASAN TEORI.....	10
C. KERANGKA BERFIKIR.....	29
BAB III METODE PENELITIAN	31
A. JENIS PENELITIAN	31

B. LOKASI DAN WAKTU PENELITIAN	32
C. TEKNIK PENGUMPULAN DATA DAN SUMBER DATA	32
D. TEKNIK ANALISIS DATA.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
A. GAMBARAN UMUM KAPAL LPG/C CIPTA <i>DIAMOND</i>	41
B. HASIL OBSERVASI KINERJA <i>TURBOCHARGER</i>	45
C. ANALISIS HUBUNGAN KINERJA <i>TURBOCHARGER</i> TERHADAP DAYA MESIN INDUK.....	46
D. ANALISIS MENGGUNAKAN <i>FISHBONE</i> DIAGRAM	46
E. PEMBAHASAN	51
BAB V PENUTUP.....	58
A. KESIMPULAN	58
B. SARAN	59
DAFTAR PUSTAKA	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen Turbocharger	12
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbocharger.....	13
Gambar 2.3 Kerangka Berfikir.....	29
Gambar 3.1 Diagram Fishbone	40
Gambar 4.1 Kapal LPG/C Cipta Diamond	42
Gambar 4.2 Ship Particular	43
Gambar 4. 3 Grafik Penurunan Kinerja Turbocharger.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Review Penelitian Sebelumnya.....	9
Tabel 2.2 Perbedaan Mesin Diesel Kapal dengan Turbocharger dan Tanpa Turbocharger.....	23
Tabel 4. 1 Hasil Observasi Faktor dan Dampak	46
Tabel 4. 2 Dampak penurunan kinerja turbocharger.....	49
Tabel 4. 3 Data hasil observasi	50

BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Dalam konteks globalisasi saat ini, pengiriman melalui laut memiliki peranan krusial dalam memperkuat jaringan logistik dan perdagangan internasional. Kapal-kapal komersial seperti LPG/C (Pengangkut Gas Bumi Cair) berfungsi sebagai moda transportasi utama yang mengalirkan gas cair antar negara dengan cara yang efisien dan aman. Transportasi laut sangat penting dalam menyokong perdagangan global, di mana kapal-kapal komersial seperti LPG/C menjadi fondasi dalam penyebaran energi berbentuk gas cair. Dalam industri pelayaran yang modern, efektivitas dan ketergantungan sistem penggerak kapal menjadi elemen kunci yang mempengaruhi suksesnya operasional, terutama pada jenis kapal niaga seperti LPG Carrier.

Salah satu komponen penting dalam sistem mesin utama kapal adalah *turbocharger*. *Turbocharger* berfungsi untuk meningkatkan efisiensi *volumetrik* mesin diesel dengan memanfaatkan gas buang untuk menekan udara masuk ke ruang bakar, sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna dan daya yang dihasilkan meningkat.

Kapal LPG/C Cipta *Diamond* menggunakan mesin diesel induk yang dilengkapi dengan sistem *turbocharging* sebagai penggerak utama. Namun, dalam praktiknya sering ditemukan permasalahan terkait penurunan performa *turbocharger* akibat akumulasi deposit karbon, keausan bantalan, atau kurangnya pemeliharaan yang optimal. Penurunan performa ini dapat

menyebabkan berkurangnya tekanan udara masuk, sehingga proses pembakaran tidak sempurna, konsumsi bahan bakar meningkat, dan emisi gas buang menjadi lebih tinggi.

Menurut Zhou et al. (2020), efisiensi *turbocharger* sangat dipengaruhi oleh kondisi kebersihan turbin dan kompresor. Jika terjadi kerusakan atau penyumbatan, tekanan *boost* akan menurun drastis dan menyebabkan penurunan daya mesin hingga lebih dari 10%. Selain itu, (Sabbaghian 2018) menunjukkan bahwa *turbocharging* yang optimal dapat meningkatkan efisiensi termal mesin hingga 40% dan secara signifikan menurunkan konsumsi bahan bakar.

Seiring dengan bertambahnya kebutuhan untuk efisiensi energi dan kepatuhan terhadap peraturan emisi global seperti IMO Tier II dan Tier III, fungsi turbocharger dalam meningkatkan kinerja mesin utama kapal menjadi semakin penting. Oleh sebab itu, analisis mendalam mengenai keterkaitan antara kinerja turbocharger dan tenaga mesin induk sangat diperlukan, supaya langkah-langkah strategis dapat diambil dalam hal pemeliharaan, peningkatan kinerja, serta penghematan biaya operasional.

Kapal jenis ini memiliki karakteristik operasi yang menuntut kestabilan, efisiensi, dan keandalan dari sistem penggerak utamanya, yaitu mesin induk diesel. Dalam memenuhi tuntutan tersebut, teknologi *turbocharger* menjadi bagian penting yang berkontribusi langsung terhadap performa daya mesin dan efisiensi pembakaran bahan bakar. Dalam operasionalnya, kapal jenis ini sangat bergantung pada performa mesin induk sebagai sumber tenaga utama penggerak kapal. Oleh karena itu, optimalisasi kinerja mesin induk menjadi faktor krusial

yang harus diperhatikan secara menyeluruh agar pelayaran dapat berjalan dengan lancar, hemat bahan bakar, dan sesuai dengan jadwal pengiriman.

Salah satu teknologi penting yang mendukung efisiensi kerja mesin diesel di kapal adalah *turbocharger*. *Turbocharger* adalah perangkat yang memanfaatkan energi kinetik dari gas buang untuk memutar turbin yang kemudian menggerakkan kompresor, dengan tujuan meningkatkan tekanan dan jumlah udara masuk ke ruang bakar mesin diesel. Semakin banyak udara yang masuk, semakin optimal pula proses pembakaran bahan bakar sehingga menghasilkan daya lebih besar. Teknologi ini telah terbukti secara luas dalam meningkatkan efisiensi termal mesin diesel hingga 40% dan mengurangi konsumsi bahan bakar serta emisi gas buang (Sabbaghian, 2018).

Turbocharger merupakan perangkat yang berfungsi meningkatkan tekanan udara masuk ke dalam silinder mesin dengan memanfaatkan energi dari gas buang. Dengan tekanan udara yang lebih tinggi, maka pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar menjadi lebih sempurna sehingga daya yang dihasilkan oleh mesin akan meningkat. Teknologi ini tidak hanya membantu meningkatkan performa mesin, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi emisi dan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya berdampak pada efisiensi operasional kapal secara keseluruhan.

Menurut (Rahman et al. 2019) dalam jurnal "*PerforMance Evaluation of a Turbocharged Marine Diesel Engine Under Different Load Conditions*", *turbocharger* yang bekerja dalam kondisi optimal mampu meningkatkan *output* daya mesin secara signifikan terutama pada beban menengah hingga tinggi. Namun, penurunan performa *turbocharger* yang disebabkan oleh penumpukan

karbon, keausan pada bearing, atau kerusakan pada turbin dapat menyebabkan turun drastisnya tekanan udara masuk, mengganggu efisiensi pembakaran, dan menurunkan daya mesin. Hal ini tentu berdampak negatif terhadap efisiensi operasi kapal, termasuk meningkatnya konsumsi bahan bakar dan potensi kerusakan mesin lanjutan.

Kondisi ini sangat relevan dengan pengoperasian kapal LPG/C Cipta *Diamond*, di mana mesin induk sebagai penggerak utama memerlukan kinerja maksimal untuk menjamin pelayaran efisien dan aman. Penurunan daya akibat masalah *turbocharger* dapat menyebabkan keterlambatan pengiriman kargo, peningkatan biaya operasional, hingga gangguan jadwal docking. Selain itu, menurut (Zhou et al. 2020) dalam jurnal *Applied Thermal Engineering*, performa *turbocharger* yang buruk juga dapat menyebabkan ketidakseimbangan suhu antar silinder yang mempercepat keausan piston dan liner.

Dalam konteks ini, perlu dilakukan analisis secara menyeluruh terhadap hubungan antara kinerja *turbocharger* dengan *output* daya mesin induk. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh langsung dari perubahan performa *turbocharger* terhadap daya mesin, menggunakan pendekatan pengukuran teknis seperti tekanan udara masuk (*scavenging air pressure*), suhu gas buang, serta konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Oil Consumption - SFOC*).

Namun demikian, kinerja *turbochargers* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional dan perawatannya. Seiring waktu, *turbocharger* dapat mengalami penurunan kinerja akibat ausnya komponen seperti impeller, penumpukan karbon, atau terjadinya kebocoran pada sistem saluran udara. Kondisi ini dapat

menyebabkan berkurangnya tekanan udara masuk dan efisiensi pembakaran yang pada akhirnya mengakibatkan penurunan daya mesin induk. Penurunan daya ini tidak hanya memperlambat laju kapal, tetapi juga dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar karena mesin harus bekerja lebih keras untuk mencapai daya yang sama seperti saat kondisi *turbocharger* masih optimal.

Kapal LPG/C Cipta *Diamond*, sebagai salah satu kapal tanker pengangkut gas cair, sangat mengandalkan stabilitas dan efisiensi mesin induknya dalam pelayaran jarak jauh. Permasalahan pada *turbocharger*, meskipun terlihat sebagai masalah teknis kecil, dapat menimbulkan efek berantai yang merugikan bagi keseluruhan operasi kapal, termasuk peningkatan biaya bahan bakar, keterlambatan pengiriman, hingga kerusakan komponen mesin lainnya.

Turbocharger memainkan peranan yang sangat penting dalam sistem mesin diesel, khususnya pada kapal-kapal niaga seperti LPG carrier, *bulk carrier*, maupun kapal container. Perangkat ini bekerja dengan memanfaatkan energi dari gas buang hasil pembakaran untuk menggerakkan turbin, yang selanjutnya memampatkan udara masuk ke ruang bakar. Hasilnya, udara yang lebih padat memungkinkan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna, meningkatkan *output* tenaga mesin tanpa harus menambah kapasitas silinder atau konsumsi bahan bakar secara signifikan.

Menurut Sabbaghian (2018), penggunaan *turbocharger* dapat meningkatkan efisiensi termal mesin diesel hingga 40%, mengurangi *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC), serta menurunkan emisi gas buang seperti NO_x dan CO₂. Dengan meningkatnya efisiensi termal, kapal dapat beroperasi dalam jangka waktu lebih lama dengan konsumsi bahan bakar yang lebih hemat.

Lebih lanjut, Zhou et al. (2020) menyatakan bahwa *turbocharger* menjadi kunci dalam mempertahankan performa mesin diesel modern karena kebutuhan udara pembakaran yang tinggi tidak bisa dipenuhi hanya dengan sistem *naturally aspirated* (tanpa *turbocharger*). Ketersediaan tekanan *boost(boostpressure)* yang stabil memungkinkan mesin menghasilkan daya maksimal dengan emisi yang lebih terkendali. *Turbocharger* juga memberikan kontribusi besar terhadap kecepatan reaksi mesin terhadap beban yang berubah-ubah saat kapal berlayar di berbagai kondisi laut.

Dalam konteks regulasi internasional, seperti IMO Tier II dan Tier III, peranan *turbocharger* menjadi semakin vital. Teknologi ini memungkinkan mesin untuk tetap mematuhi batas emisi tanpa harus melakukan perubahan drastis pada desain mesin. Penelitian oleh (Vellaiyan dan Amirthagadeswaran 2017) menunjukkan bahwa mesin dengan *turbocharging* yang dikombinasikan dengan kontrol EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) dapat memenuhi batas emisi yang ditetapkan oleh IMO tanpa mengorbankan daya mesin secara signifikan.

Selain itu, dari sisi operasional, *turbocharger* membantu menjaga kestabilan performa mesin dalam jangka panjang, mencegah penurunan daya secara tiba-tiba, dan meminimalkan gangguan operasional yang dapat menyebabkan keterlambatan pengiriman atau peningkatan biaya perawatan.

Melihat pentingnya peranan *turbocharger* dalam mendukung kinerja dan *output* daya mesin induk, maka menjadi sangat penting untuk melakukan analisis menyeluruh terhadap hubungan antara performa *turbocharger* dan daya yang dihasilkan oleh mesin. *Turbocharger* tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu, tetapi merupakan komponen integral dalam sistem pembakaran mesin

diesel modern, khususnya pada kapal-kapal besar yang mengandalkan efisiensi bahan bakar dan daya tinggi untuk mendukung aktivitas pelayaran jangka panjang.

B. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor yang memengaruhi kinerja *turbocharger* pada mesin induk kapal LPG/C Cipta *Diamond*?
2. Bagaimanadampak dari menurunnya kinerja *turbocharger* terhadap daya mesin induk?
3. Apa saja tindakan yang dapat dilakukan untuk mengatasi penurunan performa *turbocharger* agar daya mesin tetap optimal?

C. TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerja *turbocharger* pada mesin induk kapal.
2. Untuk menganalisis dampak penurunan performa *turbocharger* terhadap daya mesin induk.
3. Untuk memberikan rekomendasi tindakan teknis dalam mengatasi penurunan performa *turbocharger* guna menjaga daya mesin induk tetap optimal.

D. MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan *Manfaat* sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah dan referensi teknis mengenai hubungan antara *turbocharger* dan performa mesin induk kapal, khususnya dalam bidang teknik permesinan kapal.

2. Manfaat Praktis

- a. Memberikan informasi dan panduan teknis kepada teknisi dan *engineer* kapal dalam melakukan diagnosis terhadap penurunan daya mesin yang disebabkan oleh turbocharger.
- b. Menjadi bahan pertimbangan bagi manajemen kapal dalam menyusun strategi pemeliharaan dan peningkatan efisiensi operasional mesin induk.
- c. Sebagai acuan untuk penerapan sistem monitoring kinerja turbochargerguna mencegah kerusakan yang lebih besar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. REVIEW PENELITIAN SEBELUMNYA

Dalam mendukung dan memperkuat penelitian ini, beberapa penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik pengaruh kinerja *turbocharger* terhadap performa mesin diesel, khususnya mesin induk kapal, telah dilakukan. Berikut adalah beberapa penelitian yang menjadi rujukan:

Tabel 2.1 Review Penelitian Sebelumnya

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Saat Ini
1	Sabbaghian (2018)	Investigation of <i>Turbocharging</i> Effects on the Performance of Marine Diesel Engines	Studi eksperimental dan analisis teoritis	<i>Turbocharger</i> meningkatkan efisiensi termal hingga 40%; tekanan udara masuk berpengaruh signifikan	Menguatkan pentingnya <i>turbocharger</i> dalam meningkatkan daya dan efisiensi mesin
2	Rahman et al. (2019)	Performance Evaluation of a Turbocharged Marine Diesel Engine Under Different Load Conditions	Eksperimen laboratorium pada mesin diesel laut	Kinerja <i>turbocharger</i> meningkat pada beban tinggi, tekanan udara masuk dan daya meningkat; saat turbo menurun, konsumsi bahan bakar naik	Menjelaskan dampak langsung performa turbo terhadap daya mesin dan efisiensi
3	Zhou et al. (2020)	Impact of <i>Turbocharger</i> Fault on the Performance of Marine Diesel Engine	Analisis kerusakan komponen <i>turbocharger</i>	Kerusakan turbo menyebabkan ketidakseimbangan suhu antar silinder, daya menurun, piston cepat aus	Menjelaskan risiko teknis akibat kerusakan <i>turbocharger</i> terhadap komponen mesin induk
4	Nugroho (2021)	Analisis Efisiensi Kerja <i>Turbocharger</i> pada Mesin Diesel 4-Tak di Kapal Tanker Indonesia	Studi kasus di kapal tanker	Penurunan efisiensi turbo menyebabkan konsumsi bahan bakar meningkat dan laju kapal tidak stabil	Mendukung pentingnya pemeliharaan <i>turbocharger</i> secara berkala di kapal
5	Andika & Putra (2022)	Evaluasi Performa <i>Turbocharger</i>	Pengukuran langsung dan	<i>Turbocharger</i> rusak meningkatkan	Menghubungkan performa turbo

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Saat Ini
		Terhadap Emisi dan Daya Mesin Diesel Kapal Niaga	evaluasi emisi	emisi NOx dan CO, serta menurunkan daya mesin 15%	dengan <i>output</i> daya dan emisi gas buang

Dari berbagai penelitian yang telah dikaji, terdapat kesamaan hasil yang menunjukkan bahwa kinerja *turbochargers* sangat memengaruhi efisiensi pembakaran, penggunaan bahan bakar, emisi gas hasil pembakaran, serta tenaga dari mesin utama. Penelitian-penelitian ini menjadi landasan yang solid untuk meneruskan studi ini, dengan perhatian khusus terhadap kapal LPG/C Cipta Diamond, sehingga memberi sumbangan praktis dalam hal operasional kapal LPG di tingkat nasional.

B. LANDASAN TEORI

1. Pengertian Mesin Diesel Induk

Mesin diesel induk adalah mesin utama (*main engine*) yang berfungsi sebagai penggerak utama kapal, yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik guna menggerakkan poros baling-baling (*propeller shaft*). Mesin ini menjadi jantung dari sistem propulsi kapal, karena berperan langsung dalam menentukan kecepatan, *manuver*, serta efisiensi operasional kapal secara keseluruhan. Dalam dunia permesinan kapal, mesin diesel induk umumnya menggunakan sistem kerja dua langkah (*two-stroke*) atau empat langkah (*four-stroke*), tergantung dari ukuran dan fungsi kapal yang digunakan.

Mesin dua langkah lebih sering diterapkan pada kapal-kapal besar seperti tanker, LPG/C (*Liquefied Petroleum Gas Carrier*), *bulk carrier*, dan

containe ship, karena mampu menghasilkan torsi besar pada kecepatan putaran rendah (*low-speed diesel engine*). Ini memungkinkan kapal dapat bergerak dengan tenaga besar tanpa membutuhkan sistem reduksi kecepatan yang kompleks. Sementara itu, mesin empat langkah lebih sering digunakan pada kapal-kapal kecil atau untuk mesin bantu (*auxiliary engine*) karena memiliki desain yang lebih kompak.

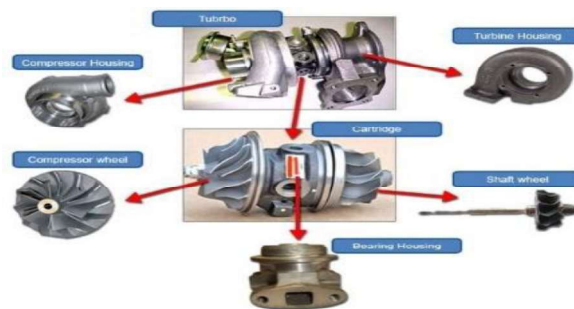
Menurut *Man Energy Solutions* (2015), mesin diesel dua langkah modern yang digunakan pada kapal-kapal besar mampu mencapai efisiensi bahan bakar yang tinggi, daya tahan terhadap beban berat, serta tingkat konsumsi pelumas yang lebih ekonomis dibandingkan dengan jenis mesin lainnya. Mesin-mesin ini biasanya dirancang untuk menggunakan bahan bakar berat (*Heavy Fuel Oil – HFO*) atau Marine Diesel Oil (MDO), dan dilengkapi dengan sistem bantu seperti *turbocharger*, *scavenging blower*, serta sistem kontrol elektronik untuk pengaturan waktu injeksi bahan bakar dan katup buang.

Proses kerja mesin diesel induk mencakup beberapa tahap, yakni pemasukan udara, kompresi, pembakaran bahan bakar, dan pembuangan gas buang. Energi hasil pembakaran akan mendorong piston ke bawah dan memutar *crankshaft*, yang kemudian akan diteruskan ke *propeller* untuk menghasilkan gaya dorong kapal. Dengan adanya *turbocharger*, suplai udara ke ruang bakar dapat ditingkatkan sehingga efisiensi dan tenaga mesin menjadi lebih besar dibandingkan dengan mesin yang tidak menggunakan sistem tersebut.

Perkembangan teknologi mesin diesel induk kini telah mengarah pada efisiensi tinggi dan ramah lingkungan, sesuai dengan regulasi IMO (*International Maritime Organization*) terkait pengurangan emisi. Oleh karena itu, pengoperasian dan perawatan mesin diesel induk, termasuk seluruh sistem pendukungnya, menjadi aspek vital dalam pengelolaan teknis kapal niaga modern.

2. Prinsip Kerja *Turbocharger*

Turbocharger adalah sebuah komponen tambahan (*auxiliary device*) pada mesin diesel yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi *volumetrik* mesin melalui proses pemampatan udara masuk sebelum dikirim ke ruang bakar. Prinsip kerja *turbocharger* adalah dengan memanfaatkan energi kinetik dari gas buang mesin yang masih memiliki tekanan dan temperatur tinggi untuk memutar turbin. Turbin ini kemudian dihubungkan dengan poros ke sisi kompresor, yang bertugas menghisap udara luar dan memampatkannya agar udara yang masuk ke silinder memiliki densitas lebih tinggi.

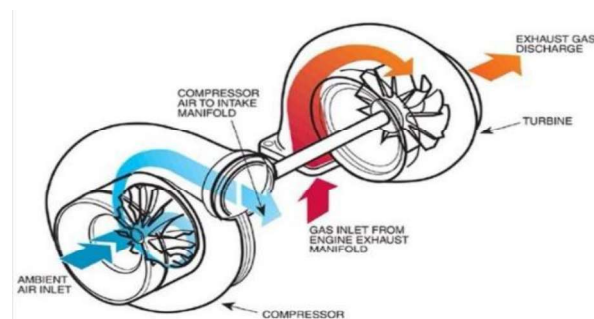


Gambar 2.1 Komponen *Turbocharger*
 Sumber : Artikel Teknologi

Udara yang lebih padat ini mengandung lebih banyak oksigen, sehingga pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar menjadi lebih sempurna. Dengan demikian, mesin mampu menghasilkan daya yang lebih

besar tanpa perlu meningkatkan dimensi fisik atau kapasitas silinder mesin. Teknologi *turbocharging* memungkinkan mesin berukuran lebih kecil dapat menghasilkan daya setara atau bahkan lebih tinggi dibandingkan mesin *naturally aspirated* (tanpa turbo) dengan volume silinder yang lebih besar.

Menurut (Sabbaghian 2018) dalam penelitiannya yang berjudul “*Investigation of Turbocharging Effects on the Performance of Marine Diesel Engines*”, penerapan *turbocharger* pada mesin diesel kapal terbukti dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 40%. Peningkatan ini dicapai karena lebih banyak energi dari bahan bakar yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik yang berguna. Selain itu, *turbocharging* juga memberikan efek positif dalam menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Oil Consumption/SFOC*) serta mengurangi emisi gas buang seperti NO_x dan CO₂, yang merupakan faktor penting dalam industri pelayaran modern yang kini dihadapkan pada regulasi lingkungan yang ketat dari IMO (*International Maritime Organization*).



Gambar 2.2 Prinsip Kerja *Turbocharger*
Sumber : Artikel Teknologi

Kinerja puncak turbocharger sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis, termasuk tekanan udara yang masuk, suhu gas yang keluar, serta rasio antara kecepatan putar turbin dengan beban dari mesin. Apabila turbocharger mengalami penurunan kinerja, seperti akibat ausnya bantalan,

adanya kebocoran udara dalam sistem masuk, atau akumulasi karbon pada bilah turbin, maka akan terjadi penurunan tekanan udara yang masuk ke ruang pembakaran. Konsekuensinya, pembakaran tidak akan ideal, tenaga mesin akan berkurang, konsumsi bahan bakar menjadi meningkat, dan suhu gas buang akan mengalami ketidakstabilan.

Selain peningkatan performa mesin, penggunaan *turbocharger* juga berdampak pada pengurangan emisi karena dengan pembakaran yang lebih sempurna, jumlah partikel sisa dan gas buang berbahaya yang dikeluarkan dari mesin menjadi lebih rendah. Hal ini membuat *turbocharger* menjadi komponen penting dalam mendukung program efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan dalam sistem permesinan kapal niaga modern.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *turbocharger* bukan hanya sekadar alat bantu, melainkan merupakan salah satu sistem vital dalam mesin diesel induk kapal yang secara langsung mempengaruhi performa, efisiensi, dan keberlangsungan operasional kapal secara keseluruhan.

3. Pengaruh *Turbocharger* Terhadap Daya Mesin

Kinerja *turbocharger* memiliki hubungan yang sangat erat dan berbanding lurus dengan daya *output* mesin diesel, terutama pada sistem propulsi kapal yang menggunakan mesin induk berbahan bakar minyak berat (*Heavy Fuel Oil*). Dalam sistem ini, *turbocharger* berfungsi sebagai unit yang memastikan suplai udara tekan yang cukup ke ruang bakar, sehingga proses pembakaran dapat berlangsung secara sempurna

Ketika tekanan udara masuk (*boostpressure*) berada dalam kisaran optimal, jumlah oksigen yang masuk ke dalam silinder juga meningkat, sehingga memungkinkan pembakaran bahan bakar secara lebih menyeluruh. Pembakaran yang lebih efisien akan menghasilkan daya dorong (*power output*) yang lebih besar dan konsumsi bahan bakar yang lebih hemat (*Specific Fuel Oil Consumption/SFOC* lebih rendah). Sebaliknya, jika kinerja *turbocharger* menurun, proses pembakaran menjadi tidak sempurna, menyebabkan hilangnya efisiensi termal, serta menurunnya daya mesin secara signifikan.

Menurut Rahman et al. (2019) dalam penelitiannya di *Journal of Marine Science and Engineering*, dua parameter utama yang sangat menentukan performa *turbocharger* adalah tekanan udara masuk dan temperatur gas buang. Keduanya menunjukkan bagaimana energi sisa dari proses pembakaran dapat dimanfaatkan ulang untuk mendukung suplai udara segar ke ruang bakar. Jika *turbocharger* mampu mempertahankan tekanan yang stabil dan temperatur gas buang berada dalam batas optimal, maka mesin akan bekerja dalam kondisi yang efisien.

Namun demikian, berbagai faktor teknis dapat menyebabkan penurunan kinerja *turbocharger*, seperti:

- a. Kebocoran pada sistem saluran udara atau *intercooler*, yang menyebabkan udara bertekanan hilang sebelum mencapai ruang bakar.
- b. Keausan pada bantalan turbin, yang menyebabkan penurunan putaran turbin dan efisiensi kompresi menurun.
- c. Tumpukan karbon pada bilah turbin dan kompresor, yang dapat

menghambat aliran gas dan memperlambat respon turbocharger.

Kondisi temperatur gas buang yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, yang berdampak pada efisiensi rotasi turbin. Ketika salah satu atau beberapa dari kondisi ini terjadi, maka *turbocharger* tidak dapat menghasilkan tekanan udara yang optimal, sehingga menyebabkan performa mesin menurun, laju kapal menjadi lebih lambat, konsumsi bahan bakar meningkat, dan potensi kerusakan pada komponen mesin lainnya juga ikut bertambah. Dalam konteks operasional kapal niaga, kondisi ini akan menurunkan efisiensi pelayaran dan meningkatkan biaya operasional secara keseluruhan.

Oleh karena itu, pemantauan performa *turbocharger* secara berkala sangat penting, baik melalui pengukuran *boostpressure*, temperatur udara masuk, temperatur gas buang, dan putaran *turbocharger*, agar mesin induk dapat terus bekerja pada performa maksimal.

4. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja *Turbocharger*

Kinerja *turbocharger* dalam sistem mesin diesel induk sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter teknis dan kondisi operasional. *Turbocharger* bekerja secara langsung memanfaatkan tekanan dan temperatur gas buang untuk memampatkan udara segar ke dalam ruang bakar. Oleh karena itu, stabilitas dan efisiensi kinerjanya sangat tergantung pada sejumlah aspek mekanis dan termal, baik dari dalam mesin maupun dari lingkungan kerja sekitarnya.

Beberapa faktor utama yang memengaruhi kinerja *turbocharger* antara lain:

- a. Kondisi Turbin dan Kompresor Turbin dan kompresor adalah dua komponen utama dalam *turbochargeryang* saling terhubung oleh poros. Jika terdapat kerusakan pada sudu turbin akibat korosi, abrasi, atau keausan mekanis, maka efisiensi aliran gas akan menurun. Hal ini berdampak langsung terhadap kemampuan *turbocharger* dalam menghasilkan tekanan udara yang cukup. Kompresor yang mengalami kerusakan baling-baling juga akan menghambat proses pemampatan udara masuk.
- b. Tekanan dan suhu gas buang turbocharger bekerja dengan memanfaatkan energi dari gas buang. Oleh karena itu, tinggi rendahnya tekanan dan temperatur gas buang sangat menentukan kecepatan putaran turbin. Temperatur yang terlalu rendah dapat mengurangi energi kinetik yang dibutuhkan turbin, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan termal pada logam-logam turbocharger.
- c. Kebersihan saluran udara masuk dan intercooler Udara yang masuk ke sistem turbo harus bebas dari kotoran, debu, atau oli. Kebersihan saluran udara masuk sangat penting karena kotoran yang menumpuk dapat menyebabkan tekanan udara berkurang, serta meningkatkan risiko terjadinya fouling pada intercooler dan kompresor. Fouling ini menurunkan efisiensi perpindahan panas dan menyebabkan tekanan udara masuk tidak stabil.
- d. Kondisi Bantalan (Bearing) Bantalan yang digunakan untuk menopang poros turbocharger harus berada dalam kondisi baik agar putaran turbin

tetap seimbang dan cepat. Zhou et al. (2020) dalam penelitiannya menyatakan bahwa keausan pada bearing adalah salah satu penyebab utama penurunan kinerja turbocharger. Keausan ini dapat menyebabkan getaran berlebih, kebocoran oli pelumas, hingga kerusakan permanen pada poros.

- e. Penumpukan Karbon dan Deposit Logam Akumulasi karbon pada turbin dan kompresor akibat pembakaran yang tidak sempurna atau kualitas bahan bakar yang buruk dapat menyebabkan gangguan pada aliran fluida dan mempengaruhi respons turbocharger terhadap perubahan beban. Bila dibiarkan, endapan ini bisa memperlambat putaran turbin secara drastis.
- f. Perawatan Preventif yang tidak memadai Turbocharger adalah sistem presisi yang membutuhkan perawatan preventif berkala, termasuk pembersihan komponen, pemeriksaan tekanan udara masuk, suhu gas buang, dan pelumasan. Kurangnya perawatan atau inspeksi berkala akan mempercepat penurunan performa unit turbocharger. Seiring waktu, kegagalan fungsi turbocharger akan menyebabkan penurunan daya mesin, peningkatan konsumsi bahan bakar, dan berisiko menyebabkan overheating atau kerusakan mesin utama.

Zhou et al. (2020) juga menambahkan bahwa gangguan *turbocharger* umumnya tidak langsung terjadi secara drastis, tetapi berkembang perlahan seiring waktu akibat kombinasi antara keausan mekanis dan kelalaian dalam pemeliharaan. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance/CBM*) kini

banyak diterapkan di kapal-kapal modern untuk menghindari kerusakan mendadak pada sistem *turbocharger*.

5. Dampak Penurunan Kinerja *Turbocharger*

Penurunan kinerja *turbocharger* merupakan salah satu masalah kritis dalam sistem mesin diesel induk, khususnya pada kapal niaga yang bergantung pada efisiensi dan kestabilan tenaga mesin untuk menjaga performa pelayaran. *Turbocharger* dirancang untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dengan cara memampatkan udara masuk ke dalam ruang bakar. Ketika *turbocharger* tidak berfungsi secara optimal, maka tekanan udara (*boost pressure*) yang masuk ke ruang bakar akan menurun, sehingga menyebabkan rasio udara-bahan bakar menjadi tidak seimbang. Akibatnya, proses pembakaran menjadi tidak sempurna.

Salah satu dampak utama dari penurunan kinerja *turbocharger* adalah penurunan *output* daya mesin (*power output*). Mesin tidak mampu menghasilkan tenaga maksimal karena energi kimia dari bahan bakar tidak dapat dikonversi secara efisien menjadi energi mekanik. Andika dan Putra (2022) dalam penelitiannya menyatakan bahwa penurunan efisiensi *turbocharger* dapat menyebabkan penurunan daya mesin hingga 15% dibandingkan dengan kondisi ideal. Hal ini sangat merugikan dalam konteks operasional kapal, karena dapat mengganggu jadwal pelayaran dan meningkatkan beban kerja mesin untuk mempertahankan kecepatan kapal.

Selain penurunan daya, penurunan kinerja *turbocharger* juga berdampak pada peningkatan konsumsi bahan bakar. Dengan pembakaran yang tidak efisien, mesin membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk

menghasilkan daya yang sama. Ini menyebabkan *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) meningkat, yang tentu berdampak pada biaya operasional kapal secara keseluruhan.

Dampak serius lainnya adalah peningkatan temperatur gas buang (*exhaust gas temperature*). Ketika suplai udara kurang optimal, pembakaran menjadi tidak sempurna dan menghasilkan residu serta gas sisa dengan temperatur tinggi. Peningkatan suhu gas buang ini dapat menyebabkan kerusakan termal pada komponen-komponen penting, seperti *exhaust valve*, *turbocharger* itu sendiri, dan bahkan ruang bakar. Dalam jangka panjang, hal ini berpotensi menimbulkan kerusakan permanen yang memerlukan perbaikan besar atau penggantian komponen.

Tak hanya berdampak secara teknis dan ekonomi, penurunan performa *turbocharger* juga memiliki konsekuensi terhadap aspek lingkungan. Pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan emisi gas buang berbahaya seperti *Nitrogen Oksida* (NOx) dan *Karbon Monoksida* (CO) dalam jumlah yang lebih tinggi. Menurut Andika dan Putra (2022), peningkatan emisi NOx dan CO yang signifikan akibat turunnya performa *turbocharger* merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran udara di sektor maritim. Kondisi ini sangat bertentangan dengan regulasi MARPOL Annex VI dari *International Maritime Organization* (IMO), yang menekankan pada pembatasan emisi dari kapal.

Oleh karena itu, penurunan performa *turbocharger* bukan hanya memengaruhi efisiensi kerja mesin, tetapi juga membawa dampak luas terhadap ekonomi, keselamatan operasi, dan kelestarian lingkungan.

Penting bagi operator kapal untuk melakukan monitoring performa *turbocharger* secara rutin, termasuk pengukuran tekanan udara masuk, suhu gas buang, dan putaran turbin. Dengan perawatan yang tepat dan diagnosis dini terhadap potensi gangguan, risiko penurunan performa mesin akibat *turbocharger* dapat diminimalkan secara signifikan.

6. Rumus Daya Indikator (*Indicated Power*)

Daya indikator (*Indicated Power / IP*) adalah daya teoritis yang dihasilkan di dalam silinder mesin akibat proses pembakaran bahan bakar, sebelum dikurangi oleh rugi-rugi mekanis seperti gesekan komponen mesin. Besarnya daya indikator dihitung berdasarkan tekanan efektif rata-rata di dalam silinder, langkah piston, luas penampang piston, jumlah putaran mesin, dan jumlah langkah per siklus. Rumus umum yang digunakan adalah:

$$IP = \frac{Pme \times L \times A \times N \times k}{60}$$

Keterangan:

- IP = Daya indikator (kW)
- Pme = Tekanan efektif rata-rata (bar)
- L = Langkah piston (m)
- A = Luas penampang piston (m²)
- N = Putaran poros engkol (rpm)
- k = Jumlah langkah per siklus (2 untuk 2-tak, 1 untuk 4-tak)

Menurut Heywood (1988), PmeP merupakan salah satu parameter kunci dalam evaluasi performa mesin, di mana peningkatan massa udara yang masuk ke ruang bakar akan meningkatkan PmeP. (MAN Energy Solutions 2015) menjelaskan bahwa *turbocharger* berperan penting dalam

meningkatkan *boostpressure*, yang secara langsung menambah jumlah udara masuk, sehingga mendukung peningkatan PmeP dan daya indikator.

Penelitian oleh Rahman et al. (2019) menunjukkan bahwa penurunan *boostpressure* sebesar 10% dapat mengurangi daya indikator hingga 6-8% pada mesin diesel laut, yang membuktikan bahwa kondisi *turbocharger* sangat mempengaruhi daya mesin.

7. Hubungan Daya Indikator (IP) dengan Daya Poros (*Brake Power*/BP)

Daya indikator (*Indicated Power / IP*) adalah daya teoritis hasil pembakaran di dalam silinder, sedangkan daya poros (*Brake Power / BP*) adalah daya aktual yang tersedia di poros engkol setelah dikurangi rugi-rugi mekanis (*mechanical losses*) seperti gesekan piston, bantalan, dan sistem katup. Hubungan keduanya dapat dituliskan:

$$BP = IP \times \eta_m$$

Atau

$$IP = \frac{BP}{\eta_m}$$

Keterangan:

BP = Daya poros (kW)

IP = Daya indikator (kW)

η_m = Efisiensi mekanis mesin (0-1)

Menurut Stone (1999), efisiensi mekanis (η_m) umumnya berkisar antara 0,8-0,9 untuk mesin diesel laut, tergantung kondisi pelumasan dan beban. Penurunan *boostpressure* akibat masalah *turbocharger* akan mengurangi PmeP (tekanan efektif rata-rata) sehingga

menurunkan IP. Dampak ini kemudian berlanjut pada penurunan BP karena energi yang ditransmisikan ke poros juga ikut menurun.

Penelitian oleh Sabbaghian (2018) menunjukkan bahwa penurunan daya indikator sebesar 5% pada mesin diesel kapal menyebabkan penurunan daya poros hingga 4%, yang secara langsung berdampak pada kecepatan jelajah kapal dan efisiensi konsumsi bahan bakar.

8. Perbedaan Mesin Diesel Kapal dengan *Turbocharger* dan Tanpa *Turbocharger*

Tabel 2.2 Perbedaan Mesin Diesel Kapal dengan *Turbocharger* dan Tanpa *Turbocharger*

Parameter	Tanpa <i>Turbocharger</i>	Dengan <i>Turbocharger</i>
Tekanan udara masuk	Rendah	Tinggi
Massa udara masuk	Sedikit	Banyak
Daya indikator (IP)	Lebih rendah	Lebih tinggi
Efisiensi bahan bakar	Lebih boros	Lebih hemat
Ukuran mesin untuk daya yang sama	Lebih besar	Lebih kecil
Cocok untuk	Mesin kecil	Mesin besar & kapal niaga

Pada mesin diesel 2-tak besar yang digunakan di kapal, proses pembilasan (*scavenging*) dan pemasukan udara terjadi sangat singkat. Agar pembakaran sempurna, mesin harus mendapatkan udara bertekanan tinggi dalam jumlah besar untuk: Membersihkan sisa gas buang (*exhaust gas*) dari silinder. Mengisi silinder dengan udara segar beroksigen tinggi untuk pembakaran berikutnya. Tanpa suplai udara bertekanan dari *turbocharger* (atau *blower*), mesin 2-tak tidak mampu membilas silinder dengan baik, sehingga: Sisa gas buang bercampur dengan udara masuk, menurunkan kualitas pembakaran. Tekanan efektif rata-rata (MEP) rendah, sehingga daya indikator turun. Pembakaran tidak sempurna meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi.

Peran *Turbocharger* di Mesin 2-Tak: *Compressor turbocharger* memasok udara segar bertekanan 2–3 bar ke ruang bilas (*scavenge receiver*). Udara ini masuk melalui port bilas dan mendorong gas buang keluar melalui katup buang di kepala silinder. Dengan pembilasan sempurna, udara masuk lebih banyak → bahan bakar dapat disemprotkan lebih optimal → daya meningkat. Efisiensi termal meningkat karena suhu gas buang lebih rendah dan pembakaran lebih sempurna.

Dua tipe utama *Turbocharger* pada mesin kapal:

- a. Aliran udara masuk secara aksial ke impeller dan keluar secara radial.
- b. Karakteristik:
 - 1) Umumnya digunakan pada mesin berukuran kecil hingga menengah.
 - 2) Memiliki respon cepat pada perubahan beban.
 - 3) Efisiensi tinggi pada putaran menengah.

Turbocharger Axial Flow (Axial/Axial-Flow Compressor) Aliran udara masuk dan keluar sejajar (*axial*) dengan poros rotor. Karakteristik:

- a. Umumnya digunakan pada mesin diesel kapal besar, khususnya mesin 2-tak *slow-speed*.
- b. Mampu menangani volume udara besar dengan efisiensi tinggi.
- c. Ukuran lebih besar, cocok untuk operasi beban konstan.

Kelebihan: kapasitas aliran sangat besar, efisiensi tinggi pada beban penuh.

Kekurangan: ukuran besar, respon agak lambat di beban rendah.

Untuk memastikan kinerja *turbocharger* tetap optimal dan mendukung efisiensi kerja mesin induk, diperlukan program pemeliharaan yang terencana dan konsisten. *Turbocharger* merupakan salah satu

komponen vital dalam sistem pembakaran mesin diesel, karena bertugas memasok udara bertekanan tinggi ke ruang bakar agar proses pembakaran berlangsung secara efisien. Tanpa pemeliharaan yang memadai, risiko penurunan performa dan kerusakan mendadak menjadi sangat tinggi, yang pada akhirnya dapat mengganggu keseluruhan operasi kapal.

Pemeliharaan *turbocharger* tidak hanya mencakup perbaikan saat kerusakan telah terjadi (*corrective maintenance*), melainkan lebih diarahkan pada pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) dan bahkan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) yang berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Tujuan utama dari strategi ini adalah untuk mengidentifikasi gejala awal gangguan dan mencegah terjadinya kerusakan besar yang berdampak pada downtime operasional.

Beberapa tindakan pemeliharaan rutin yang disarankan meliputi:

- a. Pembersihan saluran udara dan *intercooler* Udara yang masuk ke *turbocharger* harus bersih dari debu, oli, dan partikel asing lainnya. Oleh karena itu, filter udara dan *intercooler* perlu dibersihkan secara berkala agar tidak terjadi penyumbatan
- b. Pemeriksaan Tekanan Udara Masuk dan Temperatur Gas Buang
Kedua parameter ini merupakan indikator penting dalam menilai efisiensi kerja turbocharger. Jika tekanan udara masuk turun atau suhu gas buang meningkat secara tidak normal, hal ini bisa menjadi tanda awal adanya gangguan, seperti penurunan efisiensi kompresi atau penumpukan deposit karbon pada turbin. Oleh karena itu, pengukuran boostpressure dan exhaust gas temperature (EGT) harus dilakukan

secara berkala.

c. Inspeksi Visual dan Mekanis terhadap Turbin dan Kompresor

Pemeriksaan fisik terhadap bilah turbin dan kompresor sangat penting untuk mendeteksi adanya retakan, keausan, korosi, atau ketidakseimbangan putaran. Bilah turbin yang aus atau tidak seimbang dapat menyebabkan getaran berlebih dan menurunkan efisiensi rotasi.

d. Pemeriksaan Pelumasan dan Kondisi *Bearing*

Poros *turbocharger* berputar dengan kecepatan sangat tinggi dan ditopang oleh *bearing* yang dilumasi oleh oli mesin. Pemeriksaan kualitas dan tekanan oli pelumas, serta kondisi bantalan (*bearing*) harus dilakukan secara berkala. Jika terjadi keausan atau kebocoran pelumas, maka akan timbul gesekan yang berlebihan, menyebabkan *overheat* dan potensi kegagalan poros.

e. Kalibrasi sensor dan sistem monitoring Menurut Nugroho (2021) dalam jurnal *Marine Maintenance Technology*, penggunaan sistem pemantauan tekanan dan temperatur secara *real-time* sangat disarankan sebagai bagian dari strategi *preventive maintenance*. Sistem ini memungkinkan operator mendeteksi ketidakwajaran performa sejak dini dan mengambil tindakan sebelum kerusakan terjadi. Kalibrasi sensor secara berkala juga penting agar data yang dikumpulkan

f. Pencatatan dan Analisis Riwayat Kinerja *Turbocharger*

Melakukan pencatatan historis tentang performa *turbocharger* seperti perubahan tekanan, suhu, getaran, dan konsumsi bahan bakar akan membantu dalam proses *trend analysis*. Dengan demikian, penurunan

performa yang bersifat bertahap dapat diidentifikasi lebih cepat sebelum berubah menjadi kerusakan besar.

Secara keseluruhan, pemeliharaan *turbocharger* yang dilakukan secara disiplin dan terstruktur tidak hanya menjaga performa mesin tetap tinggi, tetapi juga mengurangi risiko downtime, memperpanjang umur komponen, serta meningkatkan efisiensi bahan bakar dan emisi. Dalam konteks kapal niaga, hal ini akan berdampak langsung pada peningkatan reliabilitas operasional dan efisiensi ekonomi. Pada mesin diesel kapal, putaran *turbocharger* jauh lebih tinggi dibanding putaran poros engkol mesin induk, karena *turbocharger* harus memampatkan udara dalam jumlah besar dalam waktu singkat.

Mesin Diesel *Slow-speed* 2-Tak. RPM Mesin: 60-120 rpm (poros engkol). RPM *Turbocharger*: 8.000-15.000 rpm. Perbandingan kecepatan: *turbocharger* berputar ± 100 kali lebih cepat dari poros mesin.. Contoh: Mesin *MAN B&W 6S60MC* \rightarrow poros 105 rpm, turbo *ABB TPL* \rightarrow 12.500 rpm.

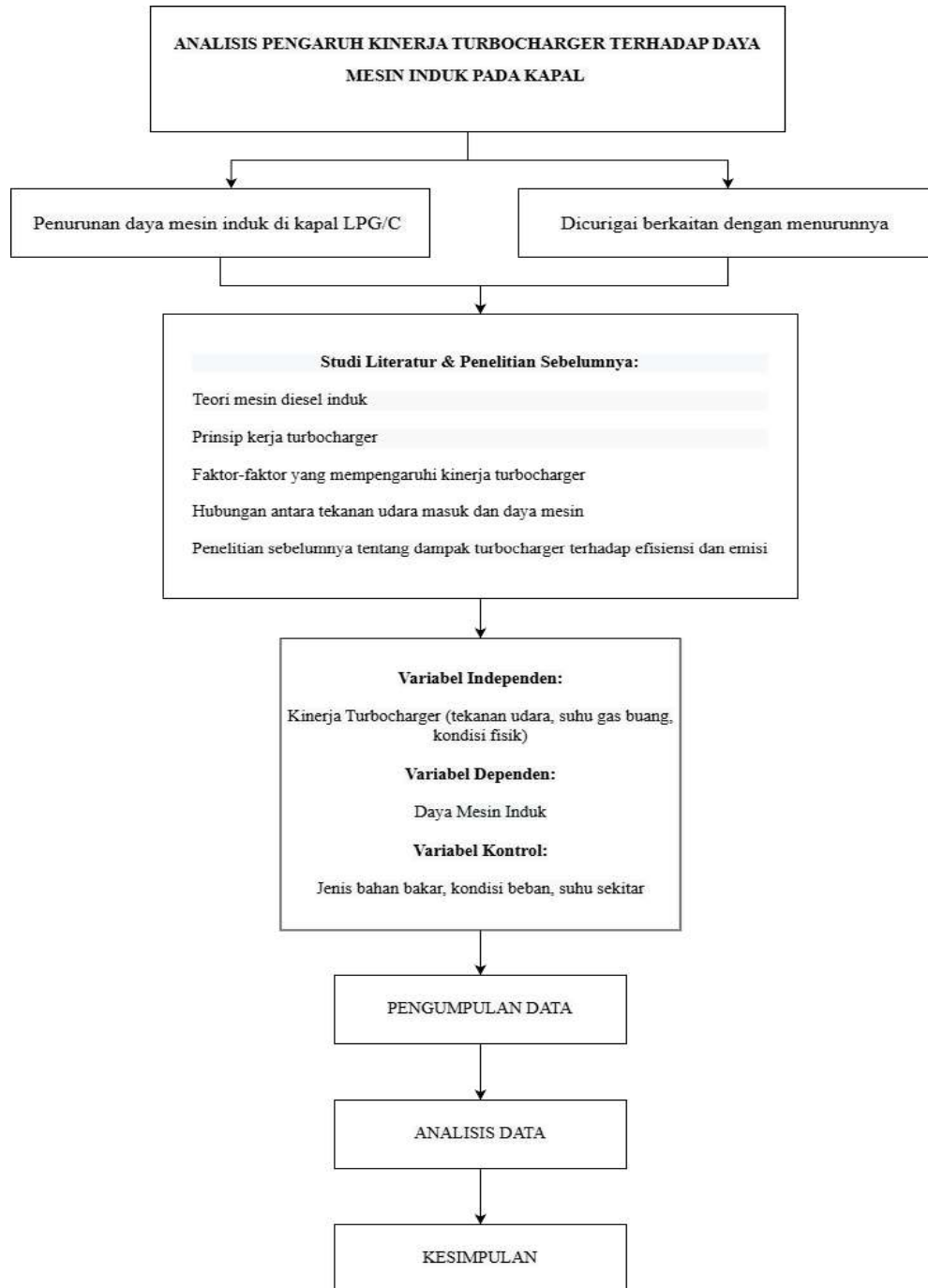
Mesin Diesel *Medium-Speed* 4-Tak. RPM Mesin: 400-1.000 rpm. RPM *Turbocharger*: 20.000 – 30.000 rpm. Contoh: Mesin *Wartsila 8L32* \rightarrow poros 720 rpm, turbo radial *ABB RR* \rightarrow 24.000 rpm. Turbin *turbocharger* digerakkan oleh gas buang berkecepatan tinggi (hingga 500–600 m/s), sehingga rotor kompresor dan turbin berputar jauh lebih cepat daripada poros engkol mesin. Putaran tinggi ini diperlukan untuk menghasilkan *boostpressure* yang cukup guna meningkatkan massa udara

yang masuk ke silinder, sehingga proses pembakaran lebih efisien dan daya mesin meningkat.

Keseimbangan antara RPM mesin induk dan RPM *turbocharger* sangat penting karena *turbocharger* dirancang bekerja optimal pada rentang kecepatan tertentu yang mengikuti beban mesin. Jika RPM *turbocharger* terlalu rendah (*under-speed*) dibanding kebutuhan mesin: *Boostpressure* turun, suplai udara pembakaran berkurang. Pembakaran tidak sempurna, asap hitam pekat di cerobong. Peningkatan konsumsi bahan bakar (SFOC naik). Risiko penumpukan karbon (*carbon deposit*) di ruang bakar, *exhaust valve*, dan turbin. Ketidakseimbangan RPM ini biasanya disebabkan oleh kebocoran gas buang, kerusakan *nozzle ring*, kerusakan blade, atau setelan beban mesin yang tidak sesuai. pemantauan *turbocharger* RPM harus menjadi bagian dari prosedur harian teknisi untuk menjaga efisiensi dan mencegah kerusakan fatal.

C. KERANGKA BERFIKIR

Berdasarkan landasan teori yang *ada*, serta didukung dengan data hasil penelitian terdahulu, maka dapat digambarkan sebuah kerangka penelitian:



Gambar 2.3 Kerangka Berfikir

BAB III

METODE PENELITIAN

A. JENIS PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif, yaitu suatu metode penelitian yang bertujuan untuk memahami fenomena teknis secara mendalam melalui pengumpulan data non-*numerik*, seperti observasi langsung, wawancara terstruktur, dan dokumentasi. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya berfokus pada hubungan kualitatif antar variabel, tetapi juga ingin mengungkap makna, pola, dan persepsi teknisi serta operator kapal terhadap performa *turbocharger* dan dampaknya terhadap daya mesin induk.

Dalam konteks ini, pendekatan kualitatif memungkinkan peneliti untuk menggali proses kerja *turbocharger* secara rinci, menilai pengalaman langsung para *engineer* terhadap penurunan performa, serta mengevaluasi strategi pemeliharaan dan penanganan masalah *turbocharger* di lapangan. Peneliti tidak membatasi diri pada pengukuran data teknis saja, tetapi juga memperhatikan konteks kerja, kondisi operasional, dan kebijakan perawatan mesin yang diterapkan di atas kapal.

Menurut Creswell (2013), pendekatan kualitatif sangat cocok digunakan untuk meneliti proses dan interaksi dalam situasi nyata (*real-world setting*), terutama ketika peneliti ingin memperoleh pemahaman mendalam dari subjek yang memiliki pengalaman langsung. Dalam hal ini, pengamatan langsung terhadap mesin induk, wawancara dengan *chief engineer*, serta analisis dokumentasi operasional mesin menjadi bagian penting dari proses penelitian.

B. LOKASI DAN WAKTU PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di atas kapal LPG/C Cipta *Diamond*, khususnya pada ruang mesin tempat *turbocharger* dan mesin induk berada.

2. Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan tanggal 5 September 2023-7 September 2024.

C. TEKNIK PENGUMPULAN DATA DAN SUMBER DATA

1. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam metode penelitian kualitatif melalui beberapa metode utama yaitu:

2. Observasi Langsung

Peneliti melakukan pengamatan langsung terhadap proses kerja *turbocharger* dan mesin induk di atas kapal LPG/C Cipta *Diamond*. Pengamatan ini mencakup perilaku operator mesin, kondisi fisik *turbocharger*, tingkat kebersihan saluran udara, suara kerja turbin, serta parameter teknis yang tampak seperti suhu gas buang dan tekanan udara masuk.

Observasi dilakukan secara sistematis dengan mencatat fenomena teknis dan visual selama mesin beroperasi normal maupun saat dilakukan pemeliharaan. Metode ini bertujuan untuk memahami proses secara alamiah tanpa intervensi dari peneliti, sebagaimana dijelaskan oleh Sugiyono (2017)

bahwa observasi dalam penelitian kualitatif bersifat partisipatif dan bertujuan menangkap makna mendalam dari aktivitas subjek

3. Studi Dokumentasi

Metode dokumentasi merupakan teknik pengumpulan data sekunder yang penting dalam penelitian teknis karena menyediakan informasi historis dan kualitatif mengenai objek yang diteliti. Dalam penelitian ini, dokumentasi digunakan untuk memperoleh data dari berbagai catatan teknis yang tersedia di kapal LPG/C Cipta *Diamond*, terutama yang berkaitan dengan kinerja *turbocharger* dan mesin induk. Dokumen yang dikaji antara lain:

- 1) *Log book* mesin harian, yang mencatat parameter operasi utama seperti tekanan udara masuk (*boostpressure*), suhu gas buang (*exhaust gas temperature*), dan beban mesin.
- 2) Rekaman data perawatan dan overhaul, yang memuat informasi tentang kondisi *turbocharger*, kompresor, dan turbin.
- 3) Data historis performa mesin, termasuk fluktuasi daya keluaran (*output power*), konsumsi bahan bakar spesifik (SFOC), dan jam operasi mesin.
- 4) Formulir inspeksi teknisi, yang memberikan informasi tambahan tentang kondisi fisik komponen sistem turbocharging.
- 5) Pengumpulan data dokumenter dilakukan melalui log book mesin, catatan tekanan udara dan temperatur gas buang, serta data historis perawatan *turbocharger*. Informasi ini digunakan sebagai data pendukung observasi dan wawancara, serta membantu menganalisis pola performa *turbocharger* dalam periode tertentu.
- 6) Dokumentasi memberikan data objektif yang menunjukkan perubahan

performa secara kronologis. Menurut Moleong (2019), dokumen merupakan sumber data yang penting dalam penelitian kualitatif karena dapat digunakan untuk triangulasi informasi dari observasi dan wawancara.

- 7) Menurut Miles, Huberman, & Saldana (2014), dokumentasi merupakan salah satu sumber data yang valid dan dapat diandalkan karena bersifat sistematis dan telah disusun oleh teknisi berdasarkan standar operasional yang konsisten. Penggunaan data sekunder ini juga didukung oleh Kumar (2020), yang menyatakan bahwa dokumentasi teknis seperti log book dan catatan operasional sangat relevan dalam penelitian teknik, terutama dalam studi sistem mesin dan efisiensinya.
- 8) Lebih lanjut, Zhou et al. (2020) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa analisis data tekanan udara dan temperatur gas buang yang terekam secara periodik dapat menjadi indikator utama dalam menilai kondisi *turbocharger* dan memprediksi kerusakan dini. Hal ini sangat membantu dalam menyusun strategi pemeliharaan preventif.

4. Wawancara Terstruktur

Wawancara terstruktur adalah metode pengumpulan data kualitatif di mana peneliti menggunakan daftar pertanyaan yang telah disusun sebelumnya untuk memastikan konsistensi dan kesesuaian informasi yang diperoleh antar responden. Dalam konteks penelitian ini, wawancara terstruktur dilakukan dengan *chief engineer* dan teknisi kapal LPG/C Cipta *Diamond*.

Dengan metode ini, peneliti tidak hanya mengandalkan data teknis dokumentasi dan observasi, tetapi juga memperoleh pengetahuan praktis dan kontekstual yang hanya dapat dijelaskan oleh praktisi lapangan yang berpengalaman. Hal ini penting karena banyak masalah operasional dan strategi pemeliharaan tidak selalu tercatat dalam log book atau data teknis, tetapi tersimpan dalam pengalaman kerja awak mesin.

Menurut Creswell (2018), wawancara terstruktur membantu peneliti mendapatkan data faktual yang dapat dikonversi menjadi bentuk kualitatif atau digunakan untuk memperkuat analisis deskriptif. Dalam praktik teknik mesin kapal, wawancara juga berguna untuk mengungkap prosedur informal atau penyesuaian teknis yang dilakukan oleh teknisi dalam situasi darurat.

Sementara itu, Rahman et al. (2019) dalam studi mereka tentang performa *turbocharger* menyebutkan bahwa wawancara dengan operator kapal menjadi bagian penting dalam validasi data sensor dan penilaian kondisi aktual mesin. Para teknisi sering kali memiliki wawasan mengenai penyebab utama penurunan kinerja *turbocharger* seperti keausan bantalan, ketidakseimbangan poros, atau kerak karbon yang sulit terdeteksi oleh sistem monitoring otomatis.

Lebih lanjut, Zhang et al. (2021) juga menekankan pentingnya wawancara terstruktur sebagai metode pendukung dalam pengumpulan data kinerja mesin, terutama untuk memahami kendala pemeliharaan dan kesesuaian implementasi SOP (*Standard Operating Procedure*) dengan kondisi lapangan.

5. Jenis dan Sumber Data

Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder. Kedua jenis data ini digunakan untuk mendukung analisis pengaruh kinerja *turbocharger* terhadap daya mesin induk pada kapal LPG/C Cipta *Diamond*.

a. Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung dari hasil observasi lapangan dan wawancara terstruktur dengan pihak terkait di atas kapal. Data ini bersifat aktual dan mencerminkan kondisi nyata operasional mesin induk dan *turbocharger*. Bentuk data primer yang dikumpulkan meliputi:

- 1) Hasil observasi langsung terhadap proses kerja *turbocharger* dan mesin induk, termasuk perilaku teknisi dalam pengoperasian serta perawatan alat (Creswell, 2018).
- 2) Hasil wawancara terstruktur dengan *chief engineer* dan teknisi mesin kapal untuk mendapatkan informasi mengenai permasalahan teknis, jadwal perawatan, tindakan darurat, serta pengalaman operasional (Zhang et al., 2021).

Metode ini dipilih karena dapat memberikan pemahaman yang kontekstual dan mendalam terhadap fenomena yang diteliti, serta menjadi pelengkap terhadap data teknis yang bersifat kualitatif.

b. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari dokumen dan catatan yang telah tersedia sebelumnya dan digunakan untuk melakukan analisis kualitatif.

Data ini mendukung proses interpretasi dan validasi dari data primer.

Jenis data sekunder yang digunakan meliputi:

- 1) Log Book Mesin: Catatan harian mengenai tekanan udara masuk, temperatur gas buang, daya mesin, konsumsi bahan bakar, dan jam operasi.
- 2) Data historis performa mesin: Berisi informasi grafik performa mesin selama pelayaran dan tren penurunan efisiensi.
- 3) Dokumentasi perawatan: Catatan overhaul turbocharger, penggantian komponen, dan inspeksi rutin (Miles et al., 2014).
- 4) Manual dan standar operasional (SOP) dari produsen mesin dan turbocharger (misalnya MAN Energy Solutions, 2015).

Data sekunder memungkinkan peneliti untuk melakukan analisis tren dan perbandingan antara kondisi ideal dan aktual, serta membantu mengidentifikasi pengaruh teknis secara lebih menyeluruh (Kumar, 2020).

D. TEKNIK ANALISIS DATA

Dalam penelitian ini, teknik analisis data dilakukan secara deskriptif kualitatif, dengan pendekatan utama menggunakan metode *Fishbone* Diagram (Ishikawa Diagram) untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab utama menurunnya daya mesin induk akibat penurunan performa *turbocharger*.

Fishbone Diagram dipilih karena mampu memetakan secara sistematis hubungan sebab-akibat antara masalah utama dan faktor teknis penyebabnya. Metode ini efektif digunakan dalam konteks pemeliharaan mesin dan sistem

permesinan kapal, untuk mengidentifikasi akar permasalahan dan menyusun strategi perbaikannya.

1. Identifikasi Masalah Utama (*Main Problem*)

Masalah utama dalam penelitian ini adalah penurunan daya mesin induk akibat menurunnya performa turbocharger. Masalah ini menjadi fokus utama karena turbocharger merupakan komponen vital yang berfungsi meningkatkan efisiensi pembakaran pada mesin diesel melalui peningkatan tekanan udara masuk (*boostpressure*). Ketika performa turbocharger menurun, suplai udara ke ruang bakar menjadi kurang optimal, sehingga pembakaran tidak berlangsung sempurna. Dampaknya langsung terasa pada daya mesin induk yang menurun, peningkatan konsumsi bahan bakar, suhu gas buang yang lebih tinggi, serta berpotensi meningkatkan emisi berbahaya.

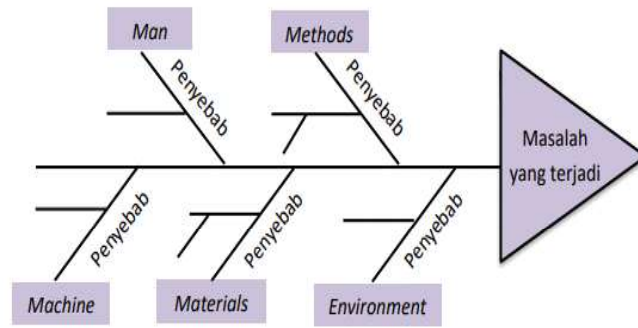
2. Pembuatan Diagram *Fishbone*

Fishbone Diagram disusun dengan cabang-cabang penyebab utama, yaitu: *Man* (Operator & Teknisi) Kurangnya pelatihan teknisi *turbocharger* dan Kesalahan saat inspeksi atau pemasangan ulang. *Method* (Metode Operasional) Prosedur pemeliharaan yang tidak konsisten dan tidak adanya checklist pemeriksaan harian. *Machine* (Peralatan/*Turbocharger*) Keausan pada *bearing* turbin, Ketidakseimbangan rotor, dan Kerusakan pada sirip kompresor. *Material* (Kualitas Bahan Bakar & Udara Masuk) Filter udara kotor, masuknya partikel asing ke sistem turbo, dan Oli pelumas yang tercemar. *Measurement* (Pengukuran & Monitoring) tidak adanya sensor *boostpressure* yang akurat dan data tekanan dan temperatur tidak dicatat

secara berkala. *Environment* (Lingkungan Operasional) Operasi di suhu tinggi tropis menyebabkan overheat dan Kondisi laut ekstrim mempercepat keausan.

Diagram Fishbone atau Diagram Ishikawa adalah salah satu metode analisis penyebab akar yang dipakai untuk memvisualisasikan berbagai elemen yang dapat menyebabkan suatu masalah atau insiden tertentu. Diagram ini memiliki bentuk menyerupai kerangka ikan dan secara luas dimanfaatkan sebagai alat analisis sebab-akibat untuk mengidentifikasi hubungan serta interaksi antarpenyebab yang bersifat kompleks dalam suatu masalah. Dengan pendekatan tersebut, Fishbone Diagram dapat digunakan sebagai kerangka analisis yang sistematis dan menyeluruh dalam menelusuri akar penyebab suatu permasalahan.

Selain itu, Fishbone Diagram memungkinkan penguraian setiap permasalahan yang telah diidentifikasi secara lebih rinci, di mana seluruh pihak yang terlibat dapat memberikan masukan terkait kemungkinan penyebab yang berkontribusi terhadap terjadinya masalah tersebut. Tahapan yang dilakukan dalam penerapan Fishbone Diagram untuk analisis akar masalah meliputi penyusunan diagram Fishbone, penentuan efek atau masalah utama, pengelompokan kategori penyebab utama, pengidentifikasian penyebab potensial melalui pengumpulan masukan, peninjauan kembali setiap kategori penyebab, penentuan penyebab yang paling mungkin melalui kesepakatan, serta penerapan hasil analisis yang diperoleh. Gambaran umum mengenai Fishbone Diagram disajikan pada bagian berikut.



Gambar 3.1 Diagram *Fishbone*

Sumber : <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v6i4.35053>