
Analisis Kebocoran *Exhaust Valve* Mesin Induk Silinder Nomor 4 dan 5 Di MV Natascha Menggunakan *Event Tree* dan *Fishbone Analysis*

Ainur Raihan Nafi Sukarto

Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

Frenki Imanto

Prodi Teknik, Politeknik Pelayaran Surabaya

Akhmad Kasan Gupron

Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

Antonius Edy Kristiyono

Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

Shofa Dai Robbi

Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

Address:

Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur 60294

Author's correspondence: airan2412@gmail.com

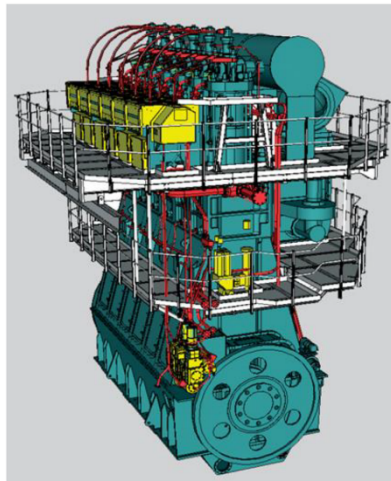
Abstract. *Ships as the main mode of transportation that has a strategic role in trade transportation, the trade supply chain really needs proper operations. The operational of the ship is greatly influenced by the performance of the main engine. One of the critical components of the main engine is the exhaust valve which functions to regulate the release of exhaust gas from the combustion chamber to the exhaust manifold. The research is qualitative, collecting data through observation, documentation, and interviews. The event tree analysis (ETA) method is implemented the sequence of impacts produced by exhaust valve, such as high working temperatures, low engine performance, and standard functions described in the manual book so that leaks can be identified. So, From this analysis, the impacts that are traced sequentially to the performance of the exhaust valve itself can also be found. In addition, a fishbone diagram is used to describe the factors that cause leaks, including human error, managerial deficiencies, neglected inspections, and errors in maintenance techniques. Thus, the right handling can be found to overcome exhaust valve leaks, such as repairs required while the engine is stopped, repeated spare part submissions from ship management, conducting spindle thickness inspections, and improving maintenance techniques as specified in the engine manual book. Proper and effective preventive and handling actions based on the root causes outlined are essential to ensure proper operation of the machine.*

Keywords: *Exhaust Valve Leakage, Maintenance, Repair.*

BACKGROUND

Industri maritim merupakan salah satu sektor yang sangat vital bagi perekonomian global. Kapal laut berperan penting dalam distribusi barang dan mobilitas manusia antar negara. Mesin induk diesel sebagai penggerak utama kapal berperan penting bagi operasional kapal laut. Keandalan operasional kapal sangat dipengaruhi oleh performa mesin induk, yaitu mesin penggerak utama yang menghasilkan tenaga untuk menggerakkan kapal. Mesin induk kapal bekerja pada tekanan dan suhu tinggi, sehingga setiap komponennya harus bekerja optimal dan saling mendukung. Salah satu komponen kritis pada mesin induk adalah *exhaust valve*. Fungsi utamanya adalah mengatur pelepasan gas sisa hasil pembakaran dari ruang bakar menuju sistem pembuangan. Kinerja *exhaust valve* yang baik akan memastikan siklus pembakaran berjalan sempurna, menjaga tekanan optimal dalam silinder, serta mencegah kebocoran gas pembakaran. Salah satu permasalahan yang berdampak pada operasional mesin induk adalah kebocoran *exhaust valve*, sehingga diperlukan suatu analisis untuk mengetahui faktor penyebab dan dampaknya bagi operasional mesin induk kapal.

Mesin Induk dan *Exhaust Valve*

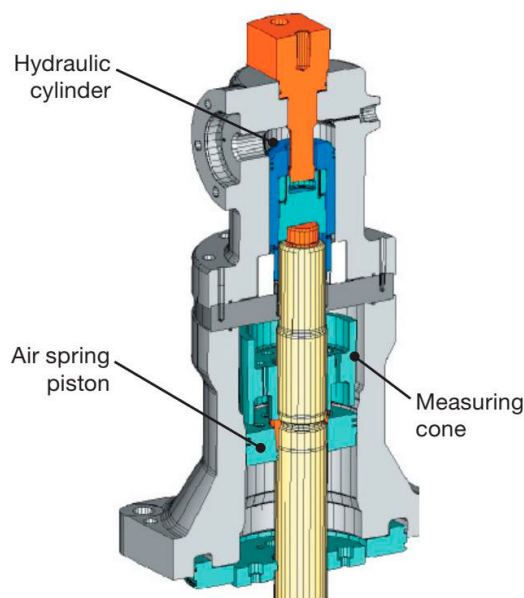


Gambar 1. Mesin Diesel 2 Tak Wärtsilä RT-flex50
(Sumber: (Tomislav Senčić et al., 2019))

Mesin diesel disebut juga sebagai mesin penyalaan kompresi adalah bentuk mesin pembakaran *piston* di mana tekanan udara tinggi di ruang pembakaran menyebabkan bahan bakar terbakar. Proses pembakaran mesin diesel menghasilkan energi panas dan meningkatkan tekanan silinder, yang kemudian diubah menjadi energi mekanis pada poros engkol (Djeli dan Saidah, 2017). Dalam ruang pembakaran di dalam silinder, diperlukan sebuah pengatur untuk pembuangan gas sisa hasil pembakaran.

Exhaust valve merupakan katup yang berfungsi sebagai pintu pembuka gas sisa hasil pembakaran sebagai saluran pembuangan (Karyanto, 2000). Dalam hal ini, kelancaran kinerja mekanisme membuka/menutupnya *exhaust valve* dalam proses pembakaran perlu diperhatikan. Kebocoran gas adalah peristiwa pelepasan gas secara tidak terkendali dari sistem tertutup yang diakibatkan oleh celah atau retakan yang muncul karena kerusakan struktural atau operasional (Heywood, 1988). Oleh karena itu, kinerja *exhaust valve* berpengaruh pada kelaiklautan kapal guna menunjang kelancaran operasional mesin induk, terutama pada tenaga pembakaran pada suatu silinder.

Cara Kerja *Exhaust Valve*



Gambar 2. *Exhaust Valve Cylinder*

(Sumber: mirmarine.net/1239-electronically-controlled-wingd-rt-flex-x-engines)

Katup pembuangan dioperasikan secara hidrolik melalui aktuator katup yang dikontrol oleh katup solenoid. Waktu pembukaan dan penutupan katup dikontrol secara elektronik, sehingga memberikan fleksibilitas dan optimalisasi kinerja mesin dalam berbagai kondisi beban. Pembukaan dan penutupan *exhaust valve* dikendalikan oleh *solenoid valve* yang mengatur aliran oli tekanan tinggi ke aktuator. Oli ini mendorong *piston* di dalam aktuator sehingga menggerakkan *valve spindle* untuk membuka *exhaust valve*. Setelah pembukaan cukup, oli dikembalikan (*bleed*), sehingga *valve* menutup kembali oleh gaya pegas dan tekanan balik (Wärtsilä Corporation, 2010).

Katup buang didinginkan dengan air untuk memastikan agar masa pakai lebih lama meskipun terkena beban panas tinggi dari gas buang (Wärtsilä Corporation, 2010). Katup

ini juga dilengkapi dengan *rotator* yang memutar *spindle* secara perlahan setiap kali katup terbuka, guna memastikan keausan pada valve seat terjadi secara merata dan mencegah terjadinya titik panas lokal (Stone, 1999). Pada mesin diesel tertentu, seperti tipe RT-flex, terdapat perbedaan di beberapa komponen, salah satunya adalah penggerak katup buang yang terletak di atas poros katup. Komponen ini dilengkapi dengan satu atau dua sensor posisi analog yang berfungsi memberikan umpan balik ke sistem WECS-9520 mengenai posisi katup saat beroperasi (Karyansky dan Ozhenko, 2019).

THEORETICAL REVIEW

Identifikasi awal terhadap penurunan kinerja mesin dapat diketahui melalui beberapa parameter. Menurut Muttaqin (2019) beberapa hal yang perlu diperhatikan saat mesin beroperasi yaitu:

1. Suhu Gas Buang: Suhu gas buang standar berkisar antara (390-420)°C. Untuk memeriksa suhu gas buang, periksa secara periodik termometer pada manifold gas buang.
2. Suara Katup: Salah satu indikator kinerja katup pembuangan yang buruk adalah munculnya suara keras yang keluar dari katup.
3. Tekanan Air Pendingin: Pada blok manometer di bagian depan mesin dapat digunakan untuk memeriksa tekanan pendingin.
4. Suhu Air Pendingin: Pada saluran masuk air tawar pendingin ke katup pembuangan terdapat termometer yang menunjukkan suhu pendingin.

Identifikasi terhadap penyebab keausan perlu diidentifikasi untuk mengetahui langkah yang akan dilakukan ketika permasalahan tersebut terjadi. Menurut Fellmann et al. (2004) penyebab keausan katup buang adalah sebagai berikut:

1. Keausan Adhesi dan Abrasi: Keausan ini sering terjadi di area batang katup (*valve stem*) akibat gesekan antara batang katup dan pemandu (*valve guide*).
2. Kelelahan Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*): Katup mengalami stres termal tinggi, menyebabkan retakan mikro yang berujung pada kegagalan katastropik.
3. Korosi Suhu Rendah: Asam sulfat mengembun menjadi cairan dan dapat merusak permukaan logam jika permukaan yang terbuka berada pada suhu lebih rendah dari titik embunnya.
4. Korosi Suhu Tinggi: "*Cobble stone corrosion*", zona korosi suhu tinggi utama yang sebagian besar memengaruhi bagian bawah poros katup.

5. Pembentukan Deposit dan Tanda Tekanan (*Dent Marks*): Endapan sisa pembakaran dan oksidasi bahan bakar menimbulkan tanda tekanan pada *valve seat*.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian kualitatif digunakan untuk mengeksplorasi kondisi-kondisi alami suatu fenomena, dengan peneliti sebagai instrumen utama. Teknik pengumpulan data dilakukan secara kombinatorik, sementara analisis data difokuskan untuk menggali makna yang mendalam daripada menghasilkan generalisasi (Sugiyono, 2020).

Teknik Pengumpulan Data

Observasi dilakukan untuk mengamati secara langsung aktivitas dan kondisi di lapangan yang berkaitan dengan objek penelitian. Dokumentasi digunakan untuk memperoleh data yang berasal dari dokumen tertulis, gambar, maupun arsip yang berkaitan dengan penelitian. Wawancara dilakukan kepada informan yang dianggap mengetahui permasalahan penelitian (Sugiyono, 2017).

Teknik Analisis Data

Untuk menganalisis dampak, peneliti mengurutkan peristiwa yang terjadi pada kebocoran *exhaust valve* mesin induk silinder nomor 4 dan 5 di MV Natascha. *Event Tree Analysis* atau ETA merupakan analisis pohon kejadian yaitu suatu teknik asesmen risiko yang digunakan untuk memodelkan urutan kejadian eksklusif yang mungkin terjadi setelah suatu peristiwa risiko awal (*initial event*), berdasarkan berfungsi atau tidaknya sistem yang dirancang untuk menanganinya (Alijoyo et al., 2021).

Fishbone analysis digunakan untuk menganalisis faktor penyebab dan penanganan yang tepat terhadap kebocoran *exhaust valve* mesin induk silinder nomor 4 dan 5 di MV Natascha. *Fishbone Analysis* adalah alat yang umum digunakan untuk membantu organisasi memecahkan masalah dengan melakukan analisis sebab dan akibat dari suatu keadaan dalam sebuah diagram yang terlihat seperti sebuah tulang ikan (Susanto dan Kristono, 2011).

RESULTS AND DISCUSSION

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Induk DU Wartsilla 6RT-flex50

Aspek	Keterangan
<i>Maker</i>	Diesel United Wartsilla
<i>Model/Type</i>	6RT-Flex50 <i>Type Marine Diesel Engine</i>
<i>Power on RPM</i>	MCR output 8890 kW on shaft speed 116 RPM NOR output 7110 kW on shaft speed 107.7 RPM
<i>Cylinder Bore/Stroke</i>	500 mm/2050 mm
<i>Air Spring Pressure/ Servo Oil Pressure</i>	5.5 - 7.5 bar/100 – 200 bar

(Sumber: Dokumen Peneliti)

Penelitian di kapal MV Natascha mengidentifikasi dampak kebocoran *exhaust valve* pada mesin induk silinder nomor 4 dan 5. Penelitian mencari faktor penyebab sehingga dapat ditemukan penanganan yang tepat terhadap faktor-faktor tersebut. Melalui pengamatan dan analisis lapangan, peneliti mempelajari cara identifikasi, metode perawatan, inspeksi, manajemen dan cara kru menangani kebocoran terhadap *exhaust valve*. Hal tersebut saling terhubung antar komponen dan untuk memahami permasalahan yang terjadi yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Hasil Observasi

1. Kebocoran *Exhaust Valve*



Gambar 3. Keretakan *Spindle Exhaust Valve* Silinder Nomor 4 dan 5
(Sumber: Dokumen Peneliti)

Permasalahan terdeteksi saat peneliti bertugas di *engine room* pukul 00.00–04.00 wib, terjadi kenaikan *temperature after cylinder* nomor 4 pada mesin induk, yang sebelumnya juga terdeteksi pada jam 20.00–24.00 WIB. Masinis 3 (*3rd engineer*)

memerintahkan peneliti untuk membuka *drain air spring* guna mengantisipasi sulitnya *spindle* menutup gas pembakaran. *Drain air spring* sempat menurunkan suhu dari 470°C menjadi 460°C, namun tindakan tersebut kurang efektif karena temperatur kembali naik. Menjelang akhir jam jaga, masinis 3 melapor kepada masinis 2 (*2nd engineer*) untuk mengevaluasi dan melakukan uji tekanan pada silinder nomor 4. Masinis 2 memutuskan menghentikan mesin induk. Seluruh kru mesin melakukan *briefing* bersama KKM (kepala kamar mesin/ *chief engineer*) untuk kemudian melaksanakan *overhaul*. *Overhaul* dilakukan dan dilanjutkan pemantauan hasil kerja. Hasil pemantauan menunjukkan kebocoran disebabkan oleh *spindle exhaust valve* yang rusak.

Kejadian serupa terjadi pada waktu berbeda di mana *temperature after cylinder* nomor 5 meningkat dari suhu normal 430°C menjadi 450°C. Peneliti membuka udara pegas untuk memastikan sistem penutupan *exhaust valve* berjalan lancar. Masinis 2 melakukan pengecekan terhadap tekanan silinder untuk memastikan dugaan kebocoran *exhaust valve*. Hasil tes mengonfirmasi adanya kebocoran sehingga diputuskan dilakukan *overhaul*. Kebocoran disebabkan *spindle exhaust valve* yang retak sama seperti pada silinder nomor 4.

2. Metode Perawatan



Gambar 4. Perawatan Menggunakan Teknik *Lapping*
(Sumber : Dokumen Peneliti)

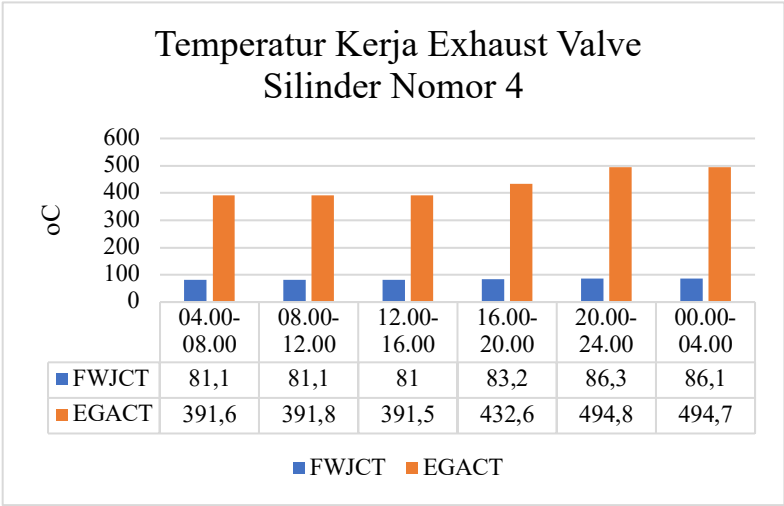
Metode perawatan *spindle* dan *seat valve* yang dilakukan penulis sejak awal prala, mulai 29 Agustus 2023 hingga 15 Februari 2024, adalah menggunakan teknik *lapping* dengan *abrassive grinding paste* bersama *foreman* selama tiga hari. Dimulai dari: membersihkan *spindle* dan *seat valve* dari residu karbon; meletakkan *spindle* di atas *seat*

valve yang dipasang pada *body exhaust valve* yang terbalik; memberi *abrassive compound*; melakukan *lapping* dengan menggerakkan *spindle* naik-turun sambil memutar sedikit ke kanan dan kiri. Pemasangan kembali komponen *exhaust valve spare* dan pengetesan kebocoran menggunakan solar dilakukan. Pada 17 Februari 2024, kapal menerima alat *grinding machine* dari perusahaan disertai *spindle* dan *seat valve* baru.

Hasil Dokumentasi

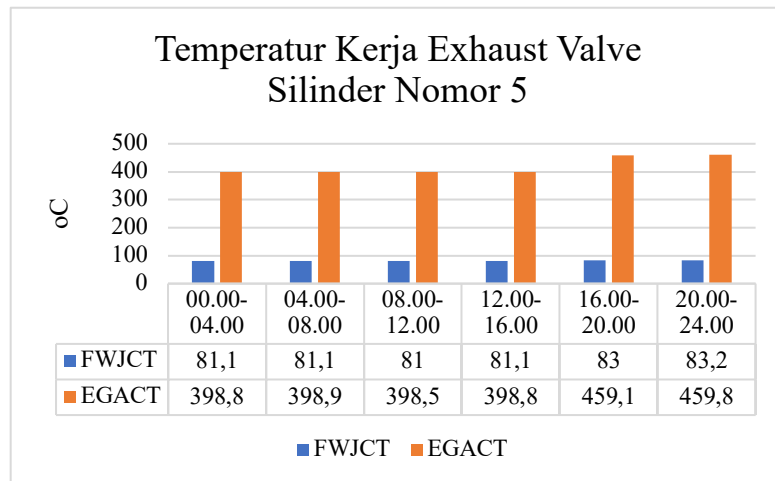
1. Log book

Berdasarkan catatan pada *log book* didapatkan data kondisi mesin. Tidak didapatkan perubahan data *scavenge under piston temperature* pada satu silinder. Dan diperoleh data yang mendukung parameter yang abnormal pada hasil kinerja *exhaust valve* yaitu *exhaust gas after cylinder temperature* (EGACT) dan *fresh water jacket cooling temperature* (FWJCT). Parameter dapat diukur dari kondisi sebelumnya, saat kebocoran, yaitu sebagai berikut:



Gambar 5. Temperatur Kerja Exhaust Valve Silinder Nomor 4
(Sumber : Dokumen Peneliti)

Log book saat kejadian kebocoran pada tanggal 14 Januari 2024, terjadi perubahan pada temperatur kerja *exhaust valve* silinder nomor 4, kondisi FWJCT dan EGACT secara berurutan: pada kondisi sebelumnya pada jam 04.00-16.00 sebesar 81°C dan 391,5°C; kenaikan awal terjadi pada jam 16.00-20.00 sore hari mencapai 83,2°C dan 432,6°C; kenaikan berlanjut pada jam 20.00 sampai 04.00 keesokan harinya mencapai 86,3°C dan 494,8°C. Terjadi kenaikan suhu sebesar 5,3 °C pada *fresh water jacket cooling* dan 103,2 °C pada *exhaust gas after cylinder*.

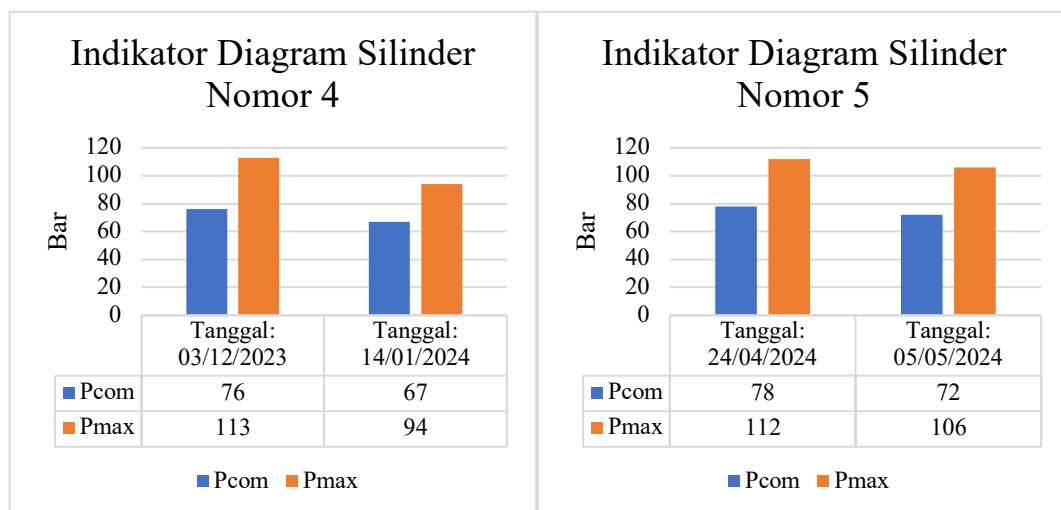


Gambar 6. Temperatur Kerja *Exhaust Valve* Silinder Nomor 5
(Sumber : Dokumen Peneliti)

Log book saat kejadian kebocoran pada tanggal 5 Mei 2024, terjadi perubahan pada temperatur kerja *exhaust valve* silinder nomor 5, kondisi FWJCT dan EGACT secara berurutan: pada kondisi sebelumnya pada jam 00.00-16.00 sebesar 81°C dan 398,5°C dan kenaikan terjadi pada jam 16.00-24.00 malam mencapai 83°C dan 459,1°C. Terjadi kenaikan suhu sebesar 2,1 °C pada *fresh water jacket cooling* dan 61,3 °C pada *exhaust gas after cylinder*, nilai ini lebih kecil dari permasalahan sebelumnya pada silinder nomor 4.

2. Indicator Diagram Of Cylinder Pressure

Indikator diagram merupakan indikasi parameter tekanan dari suatu silinder dari tenaga penggerak pembakaran dalam mesin induk. Penulis kumpulkan data berupa indikator diagram yang diambil pada saat pelayaran sebelumnya dan saat kebocoran.



Gambar 7. Indikator Diagram Mesin Induk Silinder Nomor 4 dan 5

(Sumber : Dokumen Peneliti)

Pada indikator diagram saat kebocoran *exhaust valve* memiliki tekanan yang lebih rendah dari pelayaran sebelumnya. Dimulai dari silinder nomor 4 dan 5 secara berurutan mengalami penurunan P_{com} dari 76 dan 78 bar menjadi 67 dan 72 bar, dan juga mengalami penurunan P_{max} dari 113 dan 112 bar menjadi 94 dan 106 bar.

3. WECS-9520 Exhaust Valve Close Stroke Sensor

Exhaust valve stroke sensor mendeteksi pergerakan naik-turun atau buka-tutup katup, dengan parameter mA dan ms. Sensor ini berhubungan dengan sistem udara pegas dan memengaruhi keabnormalan *timing* penutupan katup dari WECS-9520 pada mesin semi-elektrik. Diagram mA/ms tidak menunjukkan keabnormalan. Getaran kecil hanya mengindikasikan perlunya drain pada sistem *air spring*.

Hasil Wawancara

Berikut hasil wawancara yang dilakukan peneliti dengan KKM (*chief engineer*)

1. Apa dampak yang ditimbulkan kebocoran *exhaust valve* terhadap kinerja *exhaust valve* itu sendiri?

Chief engineer menjelaskan bahwa lonjakan temperatur yang tinggi menandakan kemungkinan kebocoran katup, terutama jika deviasi melebihi 50°C dan memicu alarm. Suara abnormal bisa menjadi indikator awal. Kenaikan temperatur FW *jacket cooling* dari suhu normal 80–81°C ke 84–87°C terjadi akibat panas dari *exhaust valve* yang bocor. Jika mencapai 90°C, alarm aktif dan mesin masuk mode *slow down*. Indikator P_{com} dan P_{max} menurun keduanya dan mengindikasikan kebocoran pada katup buang.

2. Apa faktor penyebab kebocoran *exhaust valve*?

Chief engineer menjelaskan bahwa kondisi kerja mesin dinilai dari kinerja katup, karena bagian dalam tidak bisa dilihat langsung. Kebocoran *exhaust valve* disebabkan *spindle valve* yang direkondisi padahal materialnya sudah tidak layak dan seharusnya diganti. Ketebalan material, terutama sisi tumbukan dan bawah *spindle*, harus diukur sesuai toleransi.

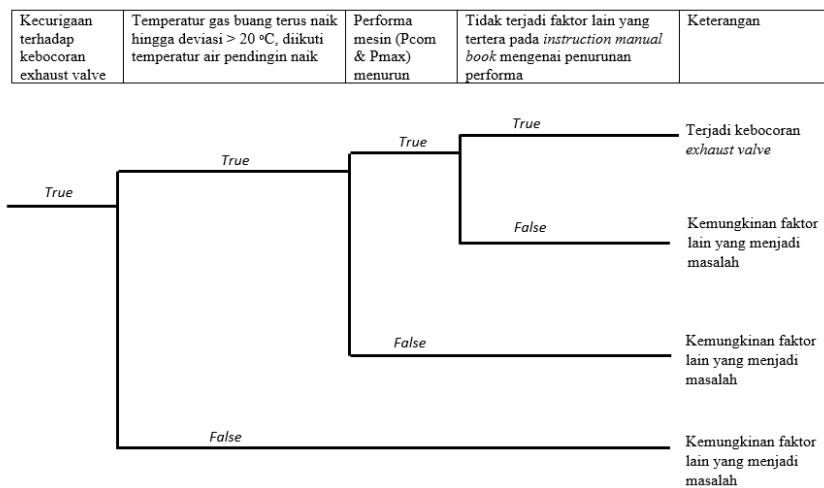
3. Bagaimana penanganan yang tepat terhadap kebocoran serta keefektifannya?

Chief engineer menjelaskan bahwa kebocoran sebaiknya segera ditangani dengan mengganti *spare* yang sudah dipersiapkan. Jika alat dari perusahaan tidak tersedia, teknik

overhaul antara *spindle* dan *seat valve* dapat dilakukan sebagai alternatif. Idealnya, perawatan dilakukan dengan *special tools* sesuai standar *maker* menggunakan *grinding machine*. Keberhasilan perawatan ditandai dengan menurunnya temperatur gas buang (390–410°C), normalnya Pcom dan Pmax, serta air pendingin kembali ke 80–81°C.

PEMBAHASAN

1. Dampak Kebocoran *Exhaust Valve* Terhadap Kinerja *Exhaust Valve* Mesin Induk Silinder Nomor 4 dan 5 di MV Natascha



Gambar 8. *Event Tree Analysis* Dampak Kebocoran Terhadap Kinerja Mesin
(Sumber : Dokumen Peneliti)

Event pada ETA menunjukkan kinerja *exhaust valve* yang abnormal. Peneliti mengidentifikasi dampak kebocoran, namun tidak menemukan indikasi kebocoran *seat valve* dari tekanan air pendingin di ruang kontrol. Suara abnormal juga tidak dapat diidentifikasi karena bisingnya mesin dan ketiadaan alat perekam.

a. *Event* Pertama, Kecurigaan Terhadap Kebocoran *Exhaust Valve*

Kecurigaan muncul saat peneliti juga pada 14 Januari 2024 bersama Masinis 3 dan 5 Maret 2024 bersama Masinis 2, terkait kinerja mesin induk yang abnormal. Peneliti kemudian melakukan pengecekan kondisi permesinan dan menindaklanjutinya pada *event* selanjutnya.

b. Event Kedua, Kenaikan Temperatur Gas Buang Dan Deviasinya $>20^{\circ}\text{C}$, Diikuti Dengan Kenaikan Temperatur Air Pendingin

Tabel 2. Standar Ideal dan Kondisi Aktual *Exhaust Gas Temperature After Cylinder* (EGAC)

Aspek	Tanggal	Standar Ideal	Kondisi Aktual	Perbedaan
Temperatur EGAC silinder 4	14/01/24	400 $^{\circ}\text{C}$	(432,6-494,7) $^{\circ}\text{C}$	+(32,6-94,7) $^{\circ}\text{C}$
Temperatur EGAC silinder 5	05/05/24	400 $^{\circ}\text{C}$	(430,8-459,8) $^{\circ}\text{C}$	+(30,8-59,8) $^{\circ}\text{C}$

(Sumber : Dokumen Peneliti)

Standar ideal temperatur gas buang adalah 400°C . Lonjakan lebih dari 20°C dalam satu hari mengindikasikan kemungkinan kebocoran *exhaust valve* (Diesel United, 2010). Atau dapat lebih dari 50°C sehingga timbul alarm. Data dari sensor menunjukkan kenaikan cepat pada temperatur *exhaust gas after cylinder* hingga memicu alarm.

Tabel 3. Standar Ideal dan Kondisi Aktual Temperatur *Fresh Water Jacket Cooling* (FWJC)

Aspek	Tanggal	Standar Ideal	Kondisi Aktual	Perbedaan
Temperatur FWJC silinder 4	14/01/24	81 $^{\circ}\text{C}$	86,1 $^{\circ}\text{C}$	+(5,1) $^{\circ}\text{C}$
Temperatur FWJC silinder 5	05/05/24	81 $^{\circ}\text{C}$	83,2 $^{\circ}\text{C}$	+(2,2) $^{\circ}\text{C}$

(Sumber : Dokumen Peneliti)

Kenaikan temperatur air pendingin *FW jacket cooling*, dari 81°C hingga $86,1^{\circ}\text{C}$, disebabkan oleh meningkatnya temperatur gas buang akibat keretakan katup. Sensor menunjukkan kenaikan stabil, bukan fluktuatif, sehingga kerusakan sensor dapat disingkirkan. Hal ini diperkuat oleh fakta bahwa temperatur air pendingin juga ikut naik, sesuai dengan kondisi aktual mesin.

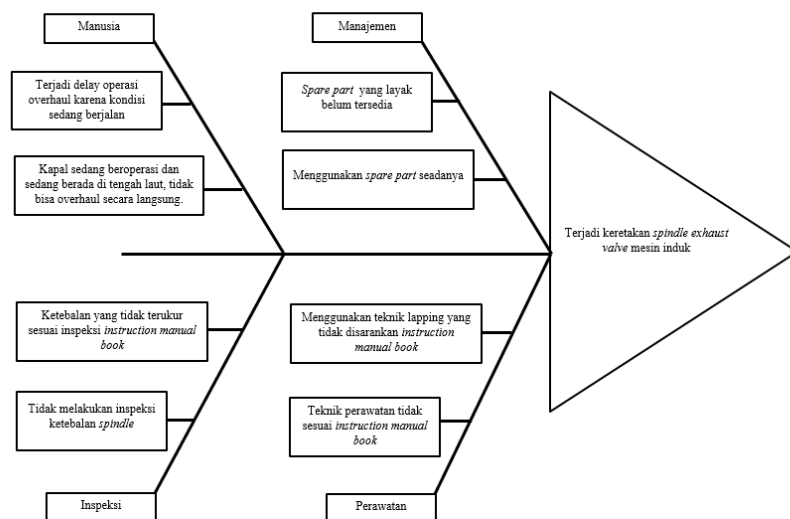
c. Event Ketiga, Menurunnya Performa (P_{com} dan P_{max}) Dari Silinder

Tekanan kompresi (P_{com}) dan tekanan maksimum (P_{max}) menunjukkan penurunan dibanding pelayaran sebelumnya, menandakan turunnya performa mesin. Sesuai manual, penurunan keduanya secara bersamaan mengindikasikan kemungkinan kebocoran *exhaust valve* akibat keretakan *spindle*. Jika hanya salah satu yang turun, bukan disebabkan kebocoran (Diesel United, 2010).

d. Event Keempat, Tidak Terjadi Hal Lain Seperti Pada *Instruction Manual Book*

Tidak ditemukan deteksi permasalahan lain seperti *suction temperature too high* dan *valve exhaust close (VEC) timing wrong* pada satu silinder dilihat dari WECS seperti yang disebutkan pada *manual book* (Diesel United, 2010). Hal ini dapat dikonfirmasi melalui *log book* mesin terhadap *scavenge under piston temperature* satu silinder yang tidak terjadi dan pengecekan WECS via laptop di ruang kontrol yang tidak mengalami keabnormalan *timing* pada satu silinder. Sehingga kebocoran *exhaust valve* pada satu silinder dapat dipastikan terjadi.

2. Menemukan Faktor Kebocoran *Exhaust Valve* Mesin Induk Silinder Nomor 4 dan 5 di MV Natascha



Gambar 9. Fishbone Diagram Terjadi Keretakan *Spindle Exhaust Valve*
(Sumber : Dokumen Peneliti)

Keretakan *spindle* dianalisis melalui *fishbone analysis* dan disebabkan oleh empat faktor utama:

a) Manusia

Faktor kesiapan teknisi dalam perawatan dan perbaikan mendorong terjadinya *delay overhaul*. Hal tersebut memperpanjang kerja mesin sehingga memperparah keretakan *spindle* dan kinerja *exhaust valve*.

b) Manajemen

Peran manajemen dalam ketersediaan *spare part* menjadi faktor penting dalam perbaikan dan perawatan. Ketika tidak tersedia suku cadang maka digunakan *spindle*

bekas untuk perbaikan. Pemenuhan terhadap permintaan suku cadang *chief engineer* kepada manajemen menjadi kunci bagi ketersediaan suku cadang di atas kapal.

c) Inspeksi

Tidak ada *template* khusus untuk mengukur ketebalan *spindle*, sehingga tes kebocoran dilakukan tanpa pengukuran ketebalan sesuai spesifikasi Wartsila 6RT-Flex50.

d) Perawatan

Perawatan menggunakan teknik *lapping* tanpa mempertimbangkan kecocokan spesifikasi mesin. *Lapping* dilakukan dengan metode penumbukan *spindle* dan *seat*, tanpa jaminan kinerja optimal jika celah terlalu rapat.

3. Penanganan Yang Tepat Serta Keefektifannya Terhadap *Exhaust Valve* Mesin Induk Silinder Nomor 4 dan 5 di MV Natascha

Keretakan *spindle* menjadi akibat dari sebab-sebab dan harus ditangani dengan tepat terhadap 4 faktor yang menjadi penyebab, diantaranya sebagai berikut:

a) Manusia

Berdasar sistem perawatan kapal, *exhaust valve* seharusnya dirawat dan diinspeksi sejak awal agar saat terjadi kebocoran, penggantian bisa segera dilakukan tanpa pembongkaran yang memakan waktu. Peneliti memisahkan pembahasan perawatan dan inspeksi. Saat insiden terjadi, putaran diturunkan dari 98 rpm menjadi 95 rpm. Dilakukan pemeriksaan pada filter *turbocharger* dan aliran air laut, serta udara pegas dicerat untuk menghilangkan kotoran.

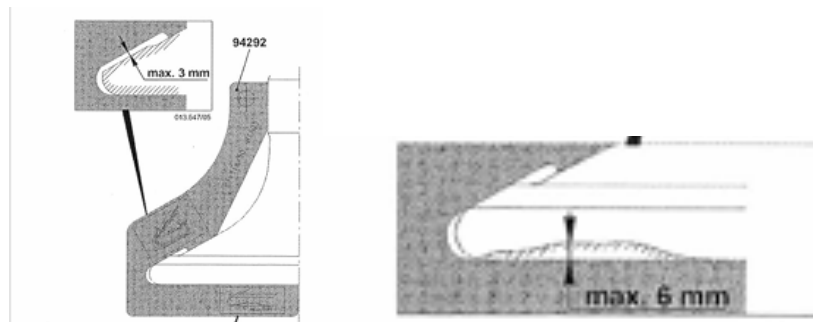
Setelah kapal berlabuh dan mesin telah dingin, *Overhaul* dimulai dengan pengecekan alat dan *spare* yang tersedia. Sistem *disetting* pada posisi manual, *fresh water jacket cooling* dimatikan dan dikuras. Komponen seperti pipa *servo*, *air spring*, dan manifold dilepas. *Valve* dilepas menggunakan *crane* dan dibawa ke bengkel. *O-ring* telah diganti sebelumnya, sedangkan *joint ring* dan *molycote* dipasang sebelum *exhaust valve* baru dipasang. Semua komponen lalu dirakit kembali.

Setelah itu, sistem pendingin diaktifkan, udara dibuang melalui *beed valve*, dan *control system* dinyalakan. Sistem *air spring* dan *hydraulic servo oil* kembali aktif, serta udara pegas dicerat 10 menit. Efektivitas *overhaul* ditunjukkan dari normalnya kembali temperatur gas buang, *fresh water jacket cooling*, dan performa mesin pada silinder yang mengalami kebocoran.

b) Manajemen

Pengajuan *spare part* berulang oleh Masinis dengan menyertakan laporan inspeksi *spindle* sesuai manual Diesel United Wartsila 6RT-Flex50. Dokumen laporan memungkinkan perusahaan menilai urgensi dan menentukan waktu pengiriman *spare part*. Keefektifannya terlihat jika perusahaan mengirim *spindle* sebelum mencapai batas maksimal pemakaian.

c) Inspeksi



Gambar 10. Indicator Diagram Of Cylinder Pressure Number 5
(Sumber: (Diesel United, 2010))

Inspeksi *spindle* bekas setelah *overhaul* penting untuk memastikan ketebalan sesuai agar dapat menutup gas pembakaran dengan baik. Keretakan *spindle* sering terjadi akibat inspeksi yang tidak sesuai manual, memperparah kondisi material. Berikut penyebab keretakan dan inspeksinya:

- 1) Korosi Suhu Rendah: Terjadi pada area tumbukan akibat pengembunan sulfur, inspeksi visual untuk menilai kelayakan.
- 2) Korosi Suhu Tinggi: Terjadi di sisi bawah *spindle* yang terkena panas tinggi, dengan batas toleransi *plate bottom* 6 mm.
- 3) Dent Mark dan Sisa Karbon: Permukaan tumbukan rentan goresan dan kotoran, perlu dibersihkan dan dicek dengan batas *ground off* 3 mm.

Untuk itu, pengukuran parameter ketebalan dicatat untuk menentukan umur material dan membantu menilai kelayakan *spare part* berdasarkan data inspeksi sebelumnya (Diesel United, 2010). Penilaian kelayakan haruslah dicatat sehingga perusahaan dapat meninjau dengan efektif mengenai kelayakan *spindle*.

d) Perawatan



Gambar 11. Indicator Diagram Of Cylinder Pressure Number 5
(Sumber : Dokumen Peneliti)

Setelah dilakukan *overhaul*, *exhaust valve* bekas direkondisi dengan langkah berikut: *spindle* dikunci di *valve rotating tool* setelah melepas *stroke sensor unit*, kemudian aktuator dipisah dan dibersihkan. *O-ring* dan *joint ring* diganti jika perlu. *Spindle* dan *seat* dipisah menggunakan *special tools*, dibersihkan dari karbon, dan diperiksa ketebalannya untuk menentukan kelayakan atau diganti baru.

Perawatan sebelumnya memakai teknik *lapping*, kemudian beralih ke teknik *grinding* dengan *grinding machine* untuk presisi lebih tinggi. *Grinding* dilakukan selama 2 hari (1 hari *spindle*, 1 hari *seat*) dengan tahapan:

- 1) Mengatur titik tengah *spindle* dan *seat* menggunakan dial gauge agar presisi.
- 2) Menentukan sudut *spindle* ($30^{\circ}20'$) dan *seat* ($30^{\circ}10'8''$) sesuai manual.
- 3) Melakukan *grinding* perlahan dengan pengaturan gerinda dan *gear* hingga bersih dari karbon dan celah.

Perbedaan sudut antara *spindle* dan *seat* disesuaikan untuk kondisi kerja, dengan kontak 50-100% dan celah 0,029-0,048 mm (Diesel United, 2010). Setelah *grinding*, dilakukan inspeksi ketebalan dengan *template*, pemasangan kembali *seat* dan *spindle* menggunakan *special tools*, serta pemasangan aktuator. Uji kebocoran dilakukan dengan memberi udara pegas dan solar, menunggu sehari, memastikan katup tidak bocor sebelum disimpan sebagai *spare*, kemudian memasang *stroke sensor unit* kembali. Oleh karena pengaturan celah dan sudut tumbukan maupun pengetesan yang berhasil dan tidak bocor, perawatan *exhaust valve* dapat dinyatakan layak dan efektif.

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Kebocoran *exhaust valve* pada silinder 4 dan 5 menyebabkan lonjakan temperatur gas buang dengan deviasi lebih dari 20°C dan kenaikan temperatur *fresh water jacket cooling*, serta penurunan tekanan Pcom dan Pmax yang berdampak pada menurunnya performa mesin. Faktor penyebab kebocoran meliputi ketidakcakapan dalam proses perbaikan mesin, ketidaktersediaan *spare part* di atas kapal, kegiatan inspeksi yang diabaikan, serta metode perawatan yang tidak sesuai dengan petunjuk pada buku *manual book*. Penanganan yang tepat meliputi pengurangan beban mesin, melakukan *overhaul* saat mesin berhenti, pengajuan *spare part* secara berulang, inspeksi ketebalan *spindle* sebelum digunakan, dan penerapan teknik perawatan sesuai dengan *instruction manual* untuk menjaga efektivitas kinerja *exhaust valve*.

Pemeriksaan rutin temperatur kerja *exhaust valve* setiap pelayaran penting untuk deteksi dini kebocoran. Dengan didukung evaluasi performa dan panduan dari *manual book*, maka ETA yang telah dibuat lebih kuat dibanding meninjau temperatur kerja saja. Berdasarkan asumsi setiap indikator yaitu indikator kenaikan temperatur gas buang, performa mesin turun, dan indikator tidak ada faktor lain menurut *manual book* didapatkan akurasi ETA sebesar 81,2%. Selain itu, dengan menggunakan *fishbone analysis* yang telah dibuat, dapat ditemukan faktor-faktor penyebab serta penanganannya terhadap kebocoran di MV Natascha yang meliputi 4 faktor yang perlu dilakukan untuk memperbaiki kebocoran dan mencegahnya terjadi kembali.

REFERENCES

- Alijoyo, A., Wijaya, B., dan Jacob, I. (2021). *Event tree analysis*. LSP LPK MKS. <https://webdev.lspmks.co.id/wp-content/uploads/2021/08/Event-Tree-Analysis.pdf>.
- Diesel United, Ltd. (2010a). *Description and Operating Instruction: Diesel United–Wärtsilä RT-flex50 Engine*. Diesel United, Ltd.
- Diesel United, Ltd. (2010b). *Special Engine Manual: Diesel United–Wärtsilä RT-flex50/50B Engine*. Diesel United, Ltd.
- Djeli, M. Y., dan Saidah, A. (2017). Pengaruh temperatur pendingin mesin terhadap kinerja mesin induk di KM TRIAKSA. *Prosiding Seminar Nasional Teknoka.*, 1.(1), M194–M198. <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/892>
- Fellmann, J., Groß, H., dan Ludwig, J. (2004). Typical wear mechanism of 2-stroke exhaust valves. *Marine Propulsion Conference 2004*.

- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Karyansky, dan Ozhenko. (2019). *Mesin WingGD tipe RT-FLEX/X dengan kontrol elektronik*. Mir Marine. <https://mirmarine.net/stati-naanglijskom/marine-engine/1239-electronically-controlled-wingd-rt-flex-xengines>
- Karyanto, E. (2000). *Panduan reparasi mesin diesel*. CV. Pedoman Ilmu Jaya.
- Muttaqin, F. (2019). *Identifikasi kebocoran gas buang pada exhaust valve di MV. Vinca*. Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.
- Stone, R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines* (2nd Edition). Macmillan Press Ltd.
- Sugiyono. (2017). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Sugiyono. (2020). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Susanto, I., dan Kristono. (2011). *Analisis Fishbone (Ishikawa diagram)*. CIO Indonesia. <https://cio-indo.blogspot.com/2011/11/analisis-fishbone-ishikawa-diagram.html>
- Tomislav Senčić, Vedran Mrzljak, Paolo Blecich, dan Igor Bonefačić. (2019). 2D CFD Simulation of Water Injection Strategies in a Large Marine Engine. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 7(No. 9, Artikel 296).
- Wärtsilä Corporation. (2010). *RT-flex50 Engine Operation Manual*. Wärtsilä Switzerland Ltd.