

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal tunda (*tugboat*) memegang peranan krusial dalam mendukung operasional pelayaran dan kepelabuhanan, sehingga keandalan sistem propulsinya harus senantiasa dipastikan kinerjanya bekerja dengan baik (Tambahkan sitasi). Salah satu permasalahan utama yang sering mengancam kinerja sistem ini adalah gangguan pada *stern tube*, khususnya pada komponen penyekat yang bertugas menjaga kestabilan pelumasan poros baling-baling (Ramadhan et al., 2025). Kegagalan fungsi ini pada akhirnya memicu kebocoran air laut secara masif ke dalam ruang mesin dan berisiko tinggi menghentikan operasional propulsi kapal secara keseluruhan (Borras et al., 2021).

Secara teknis kinerja dari komponen penyekat ini sangat bergantung pada kondisi operasional dan teknis kapal. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kegagalan sistem penyekat poros dapat dipicu oleh banyak hal, mulai dari keausan material seiring bertambahnya waktu pakai, hingga masalah ketidaksejajaran poros (*misalignment*) yang membuat beban kerja *seal* menjadi tidak merata. Faktor lain yang turut memengaruhi adalah lingkungan operasi kapal juga sangat berpengaruh, mengingat masuknya kontaminasi partikel seperti pasir atau sedimen ke dalam air pelumas dapat mempercepat gesekan dan kerusakan komponen *stern tube*. Karena kerentanan tersebut, pelaksanaan prosedur pemeliharaan yang berkala sangat penting untuk menjaga keawetan sistem kekedapan (Borras et al., 2021). Meskipun perannya sangat penting kajian spesifik yang membahas penyebab kerusakan *EVK seal* pada jenis kapal tunda ini masih memerlukan analisis lebih lanjut. Kebutuhan penelitian ini sejalan dengan kasus yang ditemukan di lapangan, yaitu adanya indikasi kebocoran pada penyekat poros baling-baling sebuah kapal tunda yang tengah menjalani perawatan di galangan. Jika dibiarkan, kebocoran ini berisiko mempercepat kerusakan pada poros dan mengganggu jadwal operasional kapal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mencari tahu dan menganalisis akar penyebab (*root cause*) kerusakan *EVK seal* tersebut secara objektif, mengevaluasi dampaknya, serta menyusun rekomendasi pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kerusakan serupa.

Penelitian ini menerapkan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan *EVK seal* pada sistem kekedapan poros baling – baling. RCA diadaptasi karena menawarkan kerangka kerja analitis yang sistematis dan komprehensif untuk mengidentifikasi akar penyebab dari suatu kegagalan teknis. Melalui penerapan prosedur investigasi yang terstruktur dan berbasis data objektif, metode ini mampu menghasilkan rumusan solusi yang presisi dan berkelanjutan; tidak sekadar menangani gejala kerusakan secara parsial, melainkan secara proaktif mencegah berulangnya kegagalan serupa di masa mendatang (Sitompul, 2024). Sebagai implikasi praktis, hasil penerapan RCA dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan evaluasi bagi perusahaan guna mengoptimalkan keandalan sistem propulsi, memperpanjang usia pakai *EVK seal*, serta mereduksi risiko penghentian operasional (*downtime*) yang berpotensi memengaruhi efisiensi maupun keselamatan kerja kapal.

1.2 Rumusan Masalah

1. Faktor-faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan fungsi pada *EVK seal* dalam sistem *stern tube* berpelumas air, dan apa akar penyebab utamanya berdasarkan analisis metode *Root Cause Analysis* (RCA)?
2. Bagaimana dampak kerusakan *EVK seal* tersebut terhadap keandalan sistem kekedapan *shaft propeller* serta komponen penunjang operasional kapal lainnya?
3. Bagaimana rekomendasi teknis perbaikan dan strategi pemeliharaan preventif yang tepat untuk mencegah terjadinya kegagalan berulang pada *EVK seal*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan fungsi pada *EVK seal* dalam sistem *stern tube* berpelumas air, serta menganalisis akar penyebab utamanya menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA).
2. Mengevaluasi dampak kerusakan *EVK seal* terhadap penurunan tingkat keandalan sistem kekedapan *shaft propeller* maupun terhadap komponen penunjang operasional kapal lainnya.
3. Merumuskan rekomendasi teknis perbaikan dan rancangan strategi pemeliharaan preventif yang efektif untuk mencegah terulangnya kegagalan pada *EVK seal* di masa mendatang.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya membahas sistem kekedapan shaft propeller pada kapal tugboat yang sedang menjalani kegiatan perawatan.
2. Komponen yang dianalisis secara mendalam dibatasi pada *mechanical seal* sebagai elemen utama sistem kekedapan shaft propeller.
3. Penelitian ini tidak membahas desain ulang *EVK seal*, melainkan berfokus pada analisis kerusakan dan penyebab kebocoran berdasarkan kondisi eksisting.
4. Penelitian ini dibatasi pada satu unit kapal dan satu jenis *EVK seal*, sehingga hasil analisis tidak dimaksudkan untuk generalisasi, melainkan sebagai referensi teknis pada kasus serupa.
5. Analisis dilakukan berdasarkan data hasil pengamatan lapangan, pemeriksaan visual komponen, dan data perawatan dan kondisi operasional kapal.
6. Penelitian ini tidak membahas perhitungan finansial atau analisis biaya, serta tidak mencakup aspek manajemen perusahaan di luar lingkup teknis permesinan kapal.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Manfaat teoritis

Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik perkapalan dan permesinan kapal, khususnya yang berkaitan dengan sistem kekedapan shaft propeller dan mekanisme kerja *EVK seal*. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara kerusakan *EVK seal*, pengaruh getaran, keausan bantalan shaft, serta ketidaksejajaran poros terhadap terjadinya kebocoran pada sistem kekedapan shaft. Dengan adanya analisis penyebab kerusakan tersebut, hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkuat konsep teoritis tentang kegagalan sistem sealing pada kapal kerja, sekaligus menjadi referensi ilmiah bagi penelitian sejenis di masa mendatang yang membahas keandalan sistem propulsi dan pencegahan kebocoran pada kapal, khususnya kapal tugboat.

2. Manfaat praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pihak-pihak yang terlibat dalam operasional dan perawatan kapal tugboat, khususnya di galangan kapal. Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang jelas mengenai penyebab kerusakan *mechanical seal* yang mengakibatkan kebocoran pada sistem kekedapan shaft propeller, sehingga dapat dijadikan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait metode pemeriksaan, perawatan, dan perbaikan sistem kekedapan shaft. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat membantu meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional kapal dengan meminimalkan risiko kebocoran, mencegah kerusakan lanjutan pada komponen permesinan, serta mengurangi waktu henti kapal selama masa operasional. Bagi pihak teknisi dan praktisi permesinan kapal, hasil penelitian ini juga dapat menjadi pedoman dalam menyusun program perawatan preventif yang lebih efektif terhadap *mechanical seal* dan komponen pendukungnya, sehingga kinerja sistem propulsi kapal tugboat dapat terjaga secara optimal.

1.6 Hipotesis

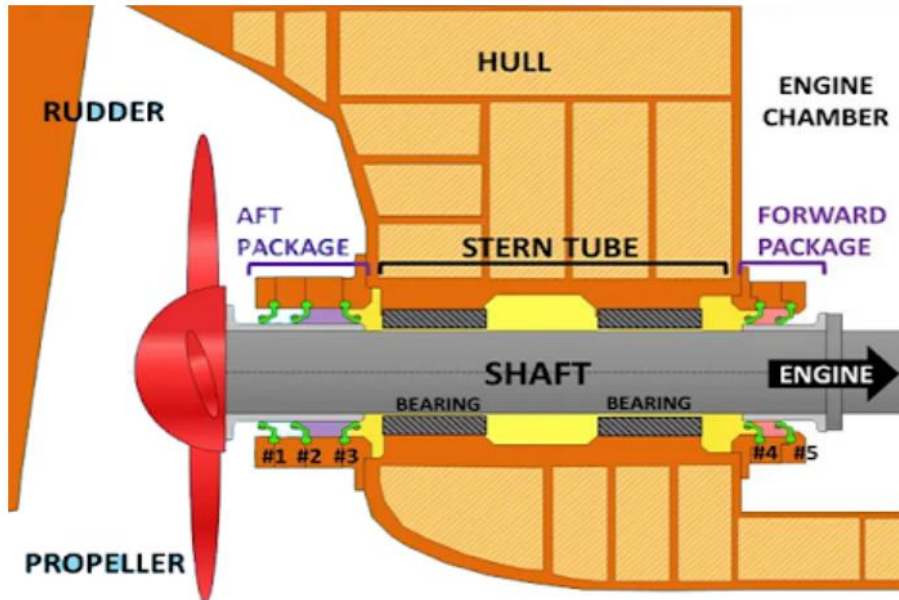
Diduga bahwa kegagalan fungsi kekedapan pada *EVK seal* tidak diakibatkan oleh cacat mekanis awal atau kesalahan instalasi, melainkan dipicu oleh kombinasi faktor lingkungan operasional, kelemahan pemeliharaan, serta beban dinamis berlebih. Operasional kapal tunda (*tugboat*) di perairan dangkal diduga memicu terbawanya sedimen lumpur masuk ke dalam tabung poros (*stern tube*). Sedimen lumpur tersebut disinyalir menempel pada area antarmuka *EVK seal* yang kemudian menyebabkan terjadinya gesekan abrasif secara berlebihan saat poros berputar. Gesekan ekstrem akibat kontaminasi partikel ini secara langsung merusak sifat material, memicu keausan, pengerasan karet, serta putusnya cincin penyekat. Kerusakan mekanis tersebut diperparah oleh timbulnya getaran berlebih yang disebabkan oleh membesarnya celah antara *shaft propeller* dan bantalan hingga melampaui batas toleransi. Akibat kombinasi antara gesekan partikel sedimen dan tegangan dari getaran poros tersebut *EVK seal* kehilangan daya kedapnya secara menyeluruh sehingga mengakibatkan kebocoran air laut pada sistem *shaft propeller*.

1.7 Luaran Penelitian

1. Publikasi artikel ilmiah di jurnal akpelni dengan judul "Analisis Penyebab Kerusakan EVK Seal Terhadap Kebocoran Sistem Kekedapan Shaft Propeller" status submit.
2. Publikasi Hak Cipta (HAKI), Modul "Permodelan 3D dan Alignment *Stern Tube System* menggunakan AutoCAD" oleh biro inovasi.
3. *Prototype* sistem pelumasan *shaft propeller* yang dilengkapi dengan berita acara serah terima barang ke-program studi teknologi rekayasa konstruksi perkapalan.

sebagai elemen vital dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasi pelayaran di pelabuhan.

2.2 Sistem Pelumasan Shaft



Gambar 2. 2 Sistem Pelumasan Shaft

(Sumber : <https://www.kapaldanlogistik.com/2024/05/pengertian-dan-fungsi-stern-tube-kapal.html>)

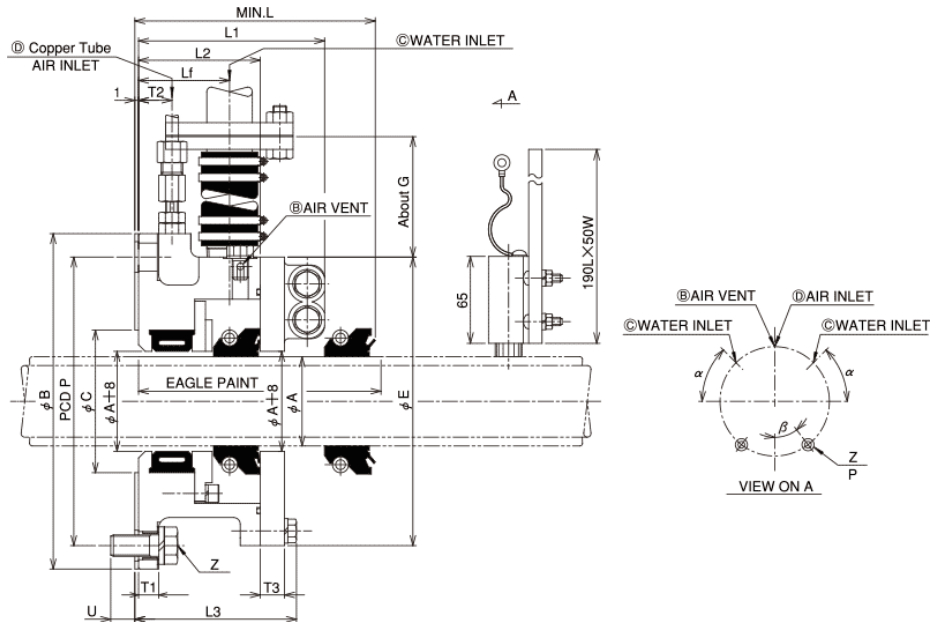
Sistem pelumasan poros baling-baling merupakan sistem propulsi kapal yang berfungsi utama untuk mengendalikan gesekan mekanis dan menjaga stabilitas putaran poros di dalam bantalan *stern tube* (Litwin, 2009). Dalam operasionalnya khususnya pada jenis kapal tunda poros baling-baling dituntut untuk menopang beban mekanis dan dinamis yang sangat tinggi. Beban ini bersumber dari berat poros itu sendiri, gaya dorong baling-baling, serta fluktuasi beban hidrodinamis saat kapal bermanuver di perairan (American Bureau of Shipping, 2018). Untuk mengakomodasi intensitas beban tersebut, sistem pelumasan bekerja dengan cara membentuk lapisan film hidrodinamis di antara permukaan poros dan bantalan (Khonsari & Booser, 2017). Pada sistem *stern tube* berpelumas air, air diinjeksikan ke dalam tabung poros untuk menjalankan fungsi ganda, yakni sebagai media pelicin (*lubricant*) sekaligus penyerap panas (*coolant*) utama (Borras et al., 2021a). Keberadaan lapisan film air ini sangat krusial dalam meniadakan kontak langsung antara poros berbahan logam dan bantalan berbahan elastomer. Dengan terpisahnya kedua permukaan tersebut, risiko terjadinya gesekan kering, lonjakan suhu ekstrem, dan keausan abrasif dapat dicegah, sehingga umur pakai serta keandalan operasional sistem propulsi dapat diperpanjang secara signifikan (Wodtke & Litwin, 2021).

Sistem pelumasan poros baling-baling secara umum diklasifikasikan berdasarkan media pelumasnya, yakni sistem pelumasan minyak dan sistem pelumasan air (Carlton, 2018). Pada konfigurasi *oil-lubricated stern tube*, bantalan poros dilumasi secara berkesinambungan menggunakan minyak mineral atau pelumas ramah

lingkungan. Pelumas ini disirkulasikan melalui sistem tangki gravitasi dan pipa untuk menciptakan bantalan cairan yang tebal, sehingga mampu menopang beban dinamis poros sekaligus mereduksi panas akibat gesekan operasional (American Bureau of Shipping, 2018). Kinerja pembentukan film hidrodinamis pada sistem ini memiliki ketergantungan mutlak terhadap keandalan sistem kekedapan poros. Komponen penyekat bertindak sebagai pembatas mekanis ganda yang berfungsi mencegah pelumas terbuang ke perairan, sekaligus memblokir masuknya air laut ke dalam *stern tube* (DNV, 2016). Apabila *seal* tersebut mengalami kebocoran air laut akan masuk ke dalam *stern tube* dan akan mendegradasi viskositas (Borras et al., 2021a). Pencemaran fluida ini akan menghancurkan keutuhan lapisan pelumas, memicu sentuhan langsung antar logam yang meningkatkan gaya gesek, dan berisiko tinggi menyebabkan lonjakan suhu ekstrem (*overheating*) pada bantalan. Mengingat interaksi teknis tersebut, sistem pelumasan dan sistem kekedapan pada poros baling-baling merupakan satu kesatuan fungsional yang tidak dapat dipisahkan dalam menjamin keandalan propulsi kapal.

Sebagai alternatif untuk mengeliminasi risiko pencemaran perairan laut yang melekat pada kegagalan sistem pelumasan minyak, industri maritim secara luas mengaplikasikan sistem pelumasan air, di mana sirkulasi air laut atau air tawar dimanfaatkan secara langsung sebagai fluida pelumas (Litwin, 2009). Dalam pengoperasiannya, air dialirkan terus-menerus ke dalam celah bantalan untuk membentuk lapisan tipis pelumas. Selain melumasi, air tersebut juga bertugas sebagai pendingin untuk menyerap panas yang timbul dari gesekan (Wodtke & Litwin, 2021). Meskipun menawarkan keunggulan berupa operasional tanpa polusi dan efisiensi pembuangan panas yang sangat baik sistem ini secara alamiah memiliki daya dukung beban yang lebih rendah karena viskositas air jauh lebih kecil dibandingkan minyak mineral (Khonsari & Booser, 2017). Mengingat air memiliki viskositas yang lebih rendah dari minyak, keberhasilan membentuk lapisan pelumas menjadi sangat sensitif terhadap perubahan kondisi operasi kapal faktor utama yang memengaruhinya adalah kecepatan putaran poros, besarnya beban yang ditahan bantalan, serta kelurusan poros. Pada kondisi operasi yang ideal, interaksi parameter-parameter tersebut akan membangkitkan profil tekanan hidrodinamis yang cukup kuat untuk mengangkat poros baling-baling. Hal ini mencegah terjadinya kontak langsung antara permukaan logam poros dan material bantalan, sehingga menjamin keandalan umur pakai sistem propulsi (Carlton, 2018). Namun lapisan pelumas ini bisa dengan mudah rusak jika terjadi masalah teknis, seperti posisi poros yang tidak sejajar (*misalignment*), getaran kapal yang terlalu kuat, dan aliran air pelumas yang terputus. gangguan tersebut akan merusak kestabilan lapisan pelumas dan memicu terjadinya gesekan berlebih, gesekan tersebut akan merusak komponen penyekat dan bantalan poros dalam waktu yang sangat singkat (Pelić et al., 2022).

2.3 Sistem Kecedapan Shaft



Gambar 2. 3 Sistem Kecedapan Shaft

(Sumber : <https://www.kemel.com/product/index005a.html>)

Sistem kekedapan poros baling-baling merupakan pelindung utama dalam sistem propulsi kapal. Sistem ini terpasang menyatu dengan *stern tube*, yaitu selubung pipa pelindung pada struktur lambung yang menjadi jalur lintasan poros dari ruang mesin menuju baling-baling (Carlton, 2018). Karena posisi poros ini selalu terendam di bawah garis air laut dan terus berputar maka sebuah sistem penyekat sangat diperlukan. Sistem ini bertugas menahan tekanan air laut dari luar agar tidak masuk ke lambung kapal, sekaligus menjaga kelancaran sirkulasi media pelumas di dalam tabung poros (American Bureau of Shipping, 2018).

Susunan komponen penyekat (*seal*) umumnya ditempatkan pada dua sisi ujung *stern tube*. Sisi pertama adalah penyekat belakang (*after seal*) yang langsung berbatasan dengan air laut untuk mencegah kotoran dan air masuk ke dalam tabung. Sisi kedua adalah penyekat depan (*forward seal*) yang membatasi ruang tabung agar fluida pelumas tidak merembes tumpah ke dalam ruang mesin (Wärtsilä, 2015). Secara prinsip kerja, komponen penyekat mekanis seperti *EVK seal* bertugas menciptakan kontak pertemuan antarmuka (*interface*) yang sangat rapat untuk mengunci aliran cairan. Dengan mekanisme ini, *seal* bertindak sebagai satu-satunya tembok fisik yang memisahkan area operasional di dalam kapal dengan lingkungan perairan luar. Posisi ini menjadikannya sangat krusial dimana kerusakan pada komponen *seal* akan berakibat langsung pada hilangnya pelumasan poros dan berisiko melumpuhkan operasional propulsi kapal secara keseluruhan (Borras et al., 2021).

2.4 Jenis – jenis Sistem Kecedapan Shaft

Sistem kekedapan poros baling-baling secara teknis bertindak sebagai penyekat dinamis antara komponen poros yang berputar dan struktur statis lambung kapal. Peran krusial dari antarmuka ini adalah memblokir intrusi air laut agar tidak membanjiri ruang mesin, sekaligus mengisolasi media pelumas dan pendingin agar tetap bersirkulasi di dalam *stern tube* tanpa mengalami kebocoran (Borras et al., 2021). Untuk menjamin keberhasilan fungsi ganda tersebut di bawah tekanan hidrostatis dan beban kerja rotasi yang bervariasi, teknologi penyekat terus dikembangkan dengan berbagai penyesuaian desain (Carlton, 2018). Oleh karena itu, berdasarkan karakteristik material, konstruksi susunan, serta prinsip kerja mekanisnya, sistem kekedapan poros kapal secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama sebagai berikut:

2.4.1 Packing Seal



Gambar 2. 4 Paking seal

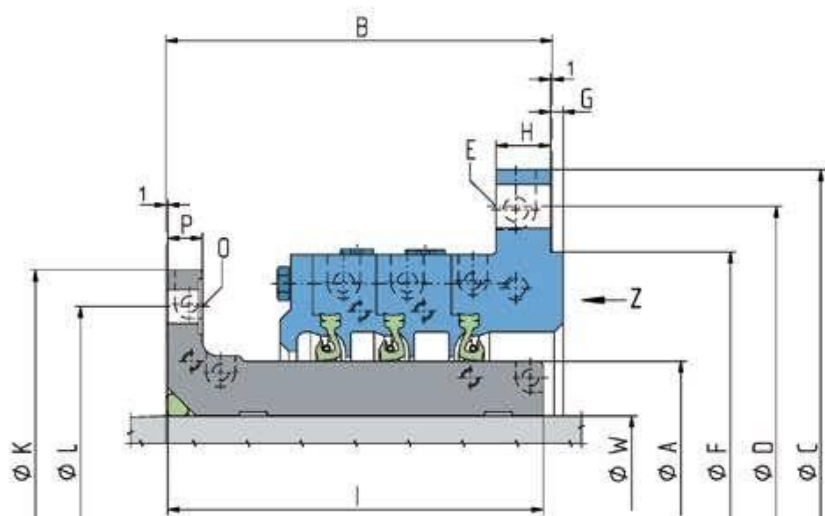
(Sumber :

<https://distributorkebutuhanindustri.web.indotrading.com/product/ram-es-packing-p375505.aspx>)

Penyekat tipe *packing* merupakan konfigurasi sistem penahan fluida yang paling konvensional dan berdesain sederhana di industri maritim. Konstruksi dasar sistem ini berpusat pada sebuah rongga penampung yang disebut *stuffing box*, di mana elemen berserat seperti *flax*, grafit, atau polimer sintesis dililitkan secara berlapis mengelilingi poros (Taylor, 1996). Secara operasional, metode ini mengandalkan prinsip kompresi mekanis statis; sebuah penekan dikencangkan secara aksial untuk memadatkan susunan material

penyekat tersebut hingga menutup batas celah antara lambung dan komponen poros yang berputar (Khonsari & Booser, 2017). Berkat kesederhanaannya komponen ini memberi kemudahan pada saat proses instalasi dan pemeliharaan yang dapat dilakukan langsung oleh kru di atas kapal tanpa membongkar struktur propulsi utama. Walaupun demikian mekanisme pemampatan fisik tersebut secara inheren memicu gaya gesek yang tinggi, sehingga operasionalnya justru mensyaratkan adanya rembesan air secara konstan sebagai media pelepas panas komponen. Degradasi material yang masif akibat gesekan kontinu ini juga mengharuskan awak kapal melakukan kalibrasi ulang atau pengencangan *gland* secara berkala guna menanggulangi pembesaran celah. Meninjau karakteristik teknis serta keterbatasan efisiensi penyegelan tersebut, implementasi jenis penyekat ini pada era modern umumnya direkomendasikan secara khusus untuk kapal berukuran kecil atau rancangan sistem propulsi berkecepatan putar (*RPM*) lambat (American Bureau of Shipping, 2018).

2.4.2 Simplex Seal



Gambar 2. 5 Simplex Seal

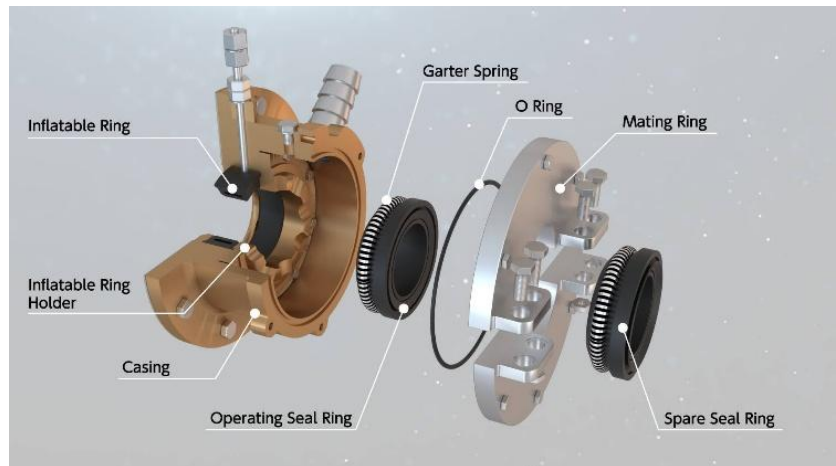
(Sumber : [https://ros.no/ws/media-](https://ros.no/ws/media-library/fd21059a12fc4355ba2a33656d117a57/simplexshaftcomponentscatalogue.pdf)

[library/fd21059a12fc4355ba2a33656d117a57/simplexshaftcomponentscatalogue.pdf](https://ros.no/ws/media-library/fd21059a12fc4355ba2a33656d117a57/simplexshaftcomponentscatalogue.pdf))

Penyekat tipe *simplex* merupakan sistem kedap hidrodinamis yang mengandalkan elemen elastis berbentuk bibir sebagai mekanisme pembatas utama fluida (SKF, 2017). Secara konstruksi, sistem ini terdiri dari selubung statis (*stationary housing*) yang menahan cincin penyekat berbahan khusus seperti *Nitrile Butadiene Rubber* (NBR) atau *Fluorocarbon* (FKM) untuk bersentuhan langsung dengan logam yang ikut berputar bersama poros baling-baling. Dalam prinsip kerjanya, profil bibir polimer tersebut dituntut untuk terus beradaptasi dengan pergerakan dinamis sistem propulsi. Guna mempertahankan tekanan kontak radial yang konstan di antarmuka komponen sekaligus mengompensasi defleksi dan keausan material elemen bibir ini dilengkapi dengan sabuk pegas melingkar (*garter spring*) yang mengikat kuat bagian

luarnya (SKF, 2017). Pada desain *stern tube* modern, cincin-cincin elastis tersebut diaplikasikan dalam susunan bertingkat dimana sebagian elemen diorientasikan secara spesifik untuk menahan tekanan air laut sementara elemen lainnya memblokir minyak pelumas. Konfigurasi berlapis ini sangat penting untuk membagi beban tekanan hidrostatik secara merata mengeliminasi risiko pencampuran kedua fluida serta menyediakan lapisan perlindungan cadangan untuk mengantisipasi kegagalan pada elemen terluar. Dibandingkan dengan sistem *packing* konvensional yang sarat akan gesekan teknologi *simplex* menawarkan toleransi tingkat kebocoran yang sangat minim dan sanggup beroperasi secara optimal pada rentang kecepatan putaran mesin (*RPM*) yang jauh lebih tinggi (SKF, 2017).

2.4.3 EVK Seal



Gambar 2. 6 EVK Seal

(Sumber : <https://www.kemel.com/product/index005a.html>)

Penyekat tipe *EVK* merupakan sistem kekedapan poros baling-baling berbasis bibir karet elastis yang digunakan pada sistem *stern tube* berpelumas air. Berbeda dengan sistem pelumasan minyak yang membutuhkan penyekat di kedua ujung tabung, *EVK seal* pada konstruksi ini hanya dipasang pada sisi dalam lambung kapal, yaitu pada batas sekat ruang mesin (Kemel, 2020). Sementara itu pada bagian luar poros tidak terdapat sistem kekedapan melainkan hanya bantalan poros yang langsung bersentuhan dengan air laut dan air pelumas. Dengan penempatan tersebut fungsi tunggal dan paling utama dari *EVK seal* adalah menahan tekanan air di dalam *stern tube* agar tidak bocor dan masuk ke dalam ruang mesin kapal. Prinsip kerja penyekat ini bertumpu pada sentuhan langsung antara material bibir karet dan selongsong poros yang berputar. Sentuhan ini dijaga agar selalu rapat dengan bantuan pegas pelingkar sehingga mampu menahan tekanan air secara terus-menerus. Walaupun dirancang untuk kondisi operasional yang berat, kinerja dan umur pakai *EVK seal* sangat bergantung pada keselarasan komponen mekanis di sekitarnya. Kemampuan menyekat air ini dapat menurun secara signifikan apabila terjadi ketidaksejajaran poros, keausan pada bantalan *stern tube*, getaran kapal yang berlebihan, serta masuknya kotoran atau partikel pasir dari perairan. Berbagai faktor teknis tersebut merupakan kondisi pemicu yang dapat mempercepat

kerusakan material penyekat, yang pada akhirnya menyebabkan hilangnya fungsi kekedapan dan memicu kebocoran fatal ke dalam ruang mesin (American Bureau of Shipping, 2018).

2.5 Inspection

Inspection adalah serangkaian proses evaluasi komprehensif dan sistematis terhadap suatu peralatan, komponen, atau sistem fisik. Tujuannya adalah untuk menilai kondisi aktual komponen tersebut, memverifikasi kesesuaiannya dengan spesifikasi desain dan standar keselamatan operasional, serta mendeteksi secara dini adanya degradasi, keausan, atau anomali mekanis. Dalam praktiknya di atas kapal, inspeksi umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama berdasarkan tujuan dan kedalaman evaluasinya:

2.5.1 Visual inspection

Visual inspection merupakan salah satu metode pemeriksaan awal yang paling sederhana namun sangat penting dalam kegiatan perawatan dan analisis kerusakan pada sistem mekanik kapal. Visual inspection dilakukan dengan cara mengamati secara langsung kondisi fisik suatu komponen untuk mengidentifikasi adanya perubahan, ketidakwajaran, atau indikasi kerusakan, seperti kebocoran, keausan, retakan, deformasi, korosi, dan perubahan warna akibat panas berlebih. Dalam konteks sistem propulsi kapal, khususnya pada sistem kekedapan shaft, visual inspection berfungsi untuk mendeteksi secara dini tanda-tanda kebocoran pelumas atau masuknya air laut, kondisi fisik seal, kebersihan area sekitar shaft, serta adanya endapan atau kontaminasi yang dapat mempengaruhi kinerja seal.

2.5.2 Clearance

Clearance merupakan jarak celah yang sengaja direncanakan antara dua komponen mekanis yang saling berhubungan atau bergerak relatif satu sama lain, dengan tujuan untuk memastikan komponen tersebut dapat beroperasi secara normal tanpa terjadi gesekan berlebih. Dalam sistem propulsi kapal khususnya pada sistem kekedapan poros baling-baling *clearance* berperan sangat krusial karena berkaitan langsung dengan kinerja penyekat dan keandalan poros yang berputar. *Clearance* yang sesuai memungkinkan terbentuknya lapisan pelumas tipis di antara permukaan poros dan elemen *seal*, sehingga gaya gesekan dapat diminimalkan dan panas yang timbul selama operasi dapat dikendalikan. *Clearance* yang terlalu rapat dapat menyebabkan gesekan berlebih antara poros dan *seal*, yang berpotensi menimbulkan keausan cepat, peningkatan temperatur kerja, dan kerusakan dini pada elemen elastis. Sebaliknya *clearance* yang terlalu longgar dapat merusak stabilitas pelumasan hidrodinamis serta mengurangi kemampuan *seal* dalam menahan tekanan fluida, sehingga meningkatkan risiko kebocoran pelumas ke perairan atau masuknya air laut ke dalam sistem ruang mesin. Oleh karena itu, penentuan dan pengawasan kelonggaran ini harus dilakukan secara presisi sesuai dengan spesifikasi desain operasional.

Untuk menjamin standar keselamatan dan keandalan operasional tersebut, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) melalui pedoman *Rules for*

Machinery Installations (Volume I) menetapkan regulasi yang ketat terkait pengawasan *clearance* pada sistem poros kapal. Berdasarkan pedoman BKI batas keausan maksimum atau *clearance* radial pada bantalan tabung poros tidak boleh melebihi batas toleransi yang disyaratkan oleh pabrikan komponen. BKI mewajibkan evaluasi *clearance* ini dilakukan secara berkala melalui kegiatan Survei Poros Baling-Baling pada saat kapal *dry docking*, umumnya menggunakan metode pengukuran *wear-down gauge* atau *poker gauge* (Biro Klasifikasi Indonesia, 2022). Apabila kelonggaran telah melampaui batas yang diizinkan oleh klasifikasi, maka poros akan berputar secara eksentris.

Tabel 2. 1 Standar Clearance

(Sumber: BKI Vol I <https://www.bkinusantara.co.id/rule-0-1.html>)

Jenis	Rumus Limit Clearance
Bantalan pelumas Air Laut	$0,01 \times D + 2,5$ (mm)
Bantalan pelumas Minyak	$0,0015 \times D + 0,65$ (mm)

2.5.3 Shaft Alignment Inspection

Shaft alignment inspection merupakan prosedur analitis yang esensial dalam evaluasi kelayakan sistem propulsi kapal khususnya untuk memvalidasi ketepatan posisi sumbu putar poros baling-baling terhadap tabung *stern tube* dan sistem kekedapan. Keselarasan yang presisi bertujuan untuk memastikan bahwa poros berputar tepat pada garis sumbu desainnya sehingga distribusi beban statis maupun dinamis dapat diterima secara merata oleh susunan bantalan tanpa membebani sistem penyekat secara berlebihan. Kondisi ketidaksejajaran poros akan membangkitkan momen lentur sekunder yang secara langsung menekan komponen *mechanical seal* secara asimetris. Pembebanan radial ekstrim yang tidak seimbang ini akan merusak pembentukan lapisan film pelumas, mempercepat destruksi material karet elastomer pada *seal*, dan pada akhirnya memicu insiden kebocoran fluida yang fatal (Lee et al., 2019).

Mengingat tingginya risiko kegagalan struktural tersebut, biro klasifikasi maritim menetapkan regulasi yang ketat terkait pengawasan keselarasan poros. Berdasarkan pedoman dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *American Bureau of Shipping* (ABS), evaluasi keselarasan wajib mengacu pada kalkulasi yang telah disetujui guna menjamin keselamatan poros di bawah berbagai variasi beban operasi. Secara praktis di kalangan pengukuran toleransi ketidaksejajaran diukur pada sambungan flensa poros menggunakan metode parameter *sag and gap* (simpangan paralel dan bukaan celah sudut). Batas deviasi maksimum yang diizinkan untuk celah tersebut umumnya sangat ketat, yakni berada pada rentang 0,05 mm hingga 0,10 mm, bergantung pada dimensi dan rasio bentang poros (American Bureau of Shipping, 2018). Lebih lanjut, regulasi klasifikasi juga mensyaratkan bahwa dampak dari toleransi keselarasan tersebut tidak boleh menyebabkan lonjakan gaya reaksi pada bantalan hingga melebihi selisih $\pm 20\%$ dari beban perhitungan desain teoretisnya. Hal ini bertujuan untuk memastikan tekanan kontak operasional tidak meremukkan bantalan maupun merobek sistem kekedapan *seal* dari pabrikan (Biro Klasifikasi Indonesia, 2022).

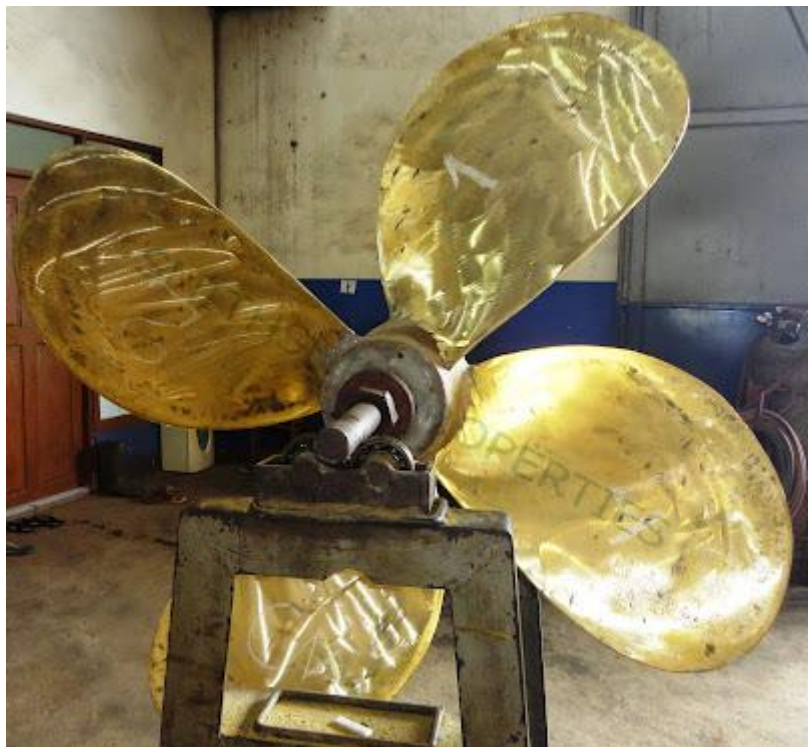
2.5.4 Pemeriksaan Propeller

Pemeriksaan propeller merupakan bagian penting dalam inspeksi sistem propulsi kapal, karena propeller berfungsi sebagai penghasil gaya dorong sekaligus sumber beban dan getaran yang diteruskan ke poros propeller, bantalan stern tube, dan sistem kekedapan shaft. Kerusakan atau ketidakseimbangan propeller dapat menyebabkan getaran berlebih dan ketidaksejajaran poros yang berdampak langsung pada kinerja *mechanical seal* serta potensi kebocoran sistem kekedapan.

1. Pemeriksaan visual *propeller*

Pemeriksaan diawali dengan inspeksi visual terhadap seluruh permukaan *propeller* untuk mengidentifikasi adanya Retak (*crack*) pada daun propeller, Kerusakan tepi daun (*erosion* atau *chipping*), Deformasi atau pembengkokan daun. Kerusakan visual pada propeller dapat mengubah karakteristik aliran dan menghasilkan gaya tidak seimbang saat propeller berputar.

2. *Balancing*



Tabel 2. 2 *Balancing Propeller*

(Sumber: <https://smithship.blogspot.com/2015/05/cara-melakukan-balancing-propeller.html>)

Pelaksanaan prosedur *balancing propeller* merupakan langkah preventif yang krusial dalam pemeliharaan sistem propulsi kapal. Kondisi ketidakseimbangan pada daun baling – baling merupakan salah satu sumber utama getaran pada poros baling-baling. Getaran tersebut akan memicu peningkatan beban dinamis secara asimetris yang menekan *stern tube bearing* dan *shaft seal* sehingga berpotensi mempercepat laju keausan komponen tersebut (Carlton, 2018).

2.6 Root Cause Analysis

Root Cause Analysis (RCA) adalah suatu metode investigasi sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) dari sebuah kegagalan, masalah, atau kejadian yang tidak diinginkan, alih-alih hanya berfokus pada penanganan gejala yang muncul di permukaan. Secara konseptual RCA berlandaskan pada prinsip bahwa setiap masalah yang terjadi dalam suatu sistem mekanis bukanlah peristiwa yang berdiri sendiri melainkan hasil dari serangkaian hubungan sebab-akibat yang saling terkait (Ketola et al., 2006). Pendekatan RCA berfokus pada evaluasi sistem dan proses operasional secara objektif, bukan untuk mencari pihak yang bersalah melainkan untuk memahami secara pasti mengapa suatu anomali teknis dapat terjadi (Rooney & Vanden Heuvel, 2004).

2.6.1 Tujuan dan Manfaat RCA

Tujuan utama dari penerapan RCA adalah untuk merumuskan solusi fundamental yang dapat mencegah terulangnya masalah yang sama dengan cara mengeliminasi penyebab dasarnya secara tuntas. Dalam disiplin ilmu perawatan permesinan RCA memberikan manfaat yang sangat besar dalam mengubah paradigma perawatan dari pendekatan reaktif menjadi pendekatan perawatan preventif. Dengan mengetahui akar masalah dari suatu kerusakan komponen jadwal pemeliharaan dan inspeksi dapat dirancang dengan lebih akurat sehingga secara langsung akan meningkatkan keandalan sistem, mengurangi waktu henti operasional kapal, serta menekan biaya perbaikan yang tidak terduga (Moblely, 1999).

2.6.2 Tahapan Pelaksanaan RCA

Untuk mencapai hasil analisis yang akurat pelaksanaan RCA harus dilakukan melalui serangkaian tahapan yang terstruktur. Menurut (Wilson et al., 1993) proses ini diawali dengan tahapan identifikasi masalah yang dimana ruang lingkup dan batasan kegagalan komponen didefinisikan secara spesifik. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data empiris di lapangan, seperti bukti fisik komponen yang rusak, catatan operasional mesin, serta hasil inspeksi visual. Setelah data terkumpul, dilakukan identifikasi faktor penyebab untuk memetakan segala variabel yang berkontribusi terhadap kegagalan. Tahapan ini dilanjutkan dengan analisis hubungan sebab-akibat guna mengurai interaksi antar-faktor tersebut. Melalui penelusuran ini penentuan akar penyebab dapat dilakukan untuk menemukan satu atau beberapa faktor fundamental yang menjadi pemicu awal. Berdasarkan temuan tersebut, disusunlah tindakan korektif yang aplikatif dan permanen. Proses ini diakhiri dengan evaluasi

efektivitas tindakan untuk memverifikasi bahwa solusi yang diterapkan benar-benar berhasil menghilangkan akar masalah teknis di lapangan.

2.6.3 Metode dan Instrumen dalam RCA

Dalam menjabarkan tahapan analisis sebab-akibat, terdapat berbagai macam instrumen yang umum digunakan untuk memvisualisasikan akar masalah. *Fishbone Diagram* (Diagram Ishikawa) dan *Cause and Effect Diagram* sering dimanfaatkan untuk mengategorikan potensi penyebab berdasarkan kelompok utama, seperti manusia, mesin, metode, dan material. Untuk menelusuri fenomena kerusakan secara lebih mendalam metode *5 Why Analysis* digunakan dengan cara mengajukan pertanyaan "mengapa" secara iteratif hingga akar masalah fundamental ditemukan. Selain itu *Fault Tree Analysis* (FTA) diimplementasikan untuk membedah logika kegagalan sistem yang kompleks melalui analisis deduktif berbasis gerbang logika. Sementara itu *Pareto Analysis* digunakan secara statistik untuk memprioritaskan penyelesaian masalah berdasarkan faktor penyebab yang memiliki frekuensi kemunculan tertinggi (Doggett, 2005). Pemilihan instrumen ini disesuaikan dengan tingkat kompleksitas masalah mekanis yang sedang diinvestigasi.

2.7 Penelitian Terdahulu

Tinjauan terhadap sejumlah studi terdahulu mengindikasikan bahwa sistem propulsi kapal beroperasi sebagai satu kesatuan fungsional yang terintegrasi, di mana keandalan poros baling-baling, bantalan tabung poros, sirkulasi media pelumas, dan sistem kekedapan saling bergantung secara mekanis (Carlton, 2018). Berbagai literatur tribologi maritim membuktikan bahwa kegagalan fungsional pada komponen penyekat bukanlah fenomena yang terisolasi melainkan respons langsung terhadap anomali operasional pada sistem poros secara keseluruhan (Borras et al., 2021). Penurunan kinerja dan kerusakan profil *seal* terbukti dipicu oleh serangkaian faktor eksternal, mulai dari kondisi ketidaksejajaran poros yang mendistribusikan beban secara asimetris, tingginya amplitudo getaran struktural, keausan bantalan yang mengubah ruang celah pelumasan, hingga degradasi kualitas media pendingin selama kapal beroperasi (Pelić et al., 2022). Meskipun peta kegagalan sistem penyekat poros secara umum telah banyak dieksplorasi, literatur empiris yang secara spesifik membedah mekanisme kerusakan pada varian *EVK seal* di dalam sistem *stern tube* berpelumas air masih sangat terbatas. Keterbatasan kajian ini semakin terlihat apabila dihadapkan pada profil operasi kapal bermanuver dinamis dan bertorsi tinggi seperti kapal tunda. Berangkat dari celah penelitian tersebut penelusuran sistematis melalui pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) menjadi sangat esensial untuk memetakan rantai sebab-akibat secara presisi guna mengidentifikasi akar penyebab dari kegagalan *EVK seal* pada kondisi operasional aktual di lapangan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

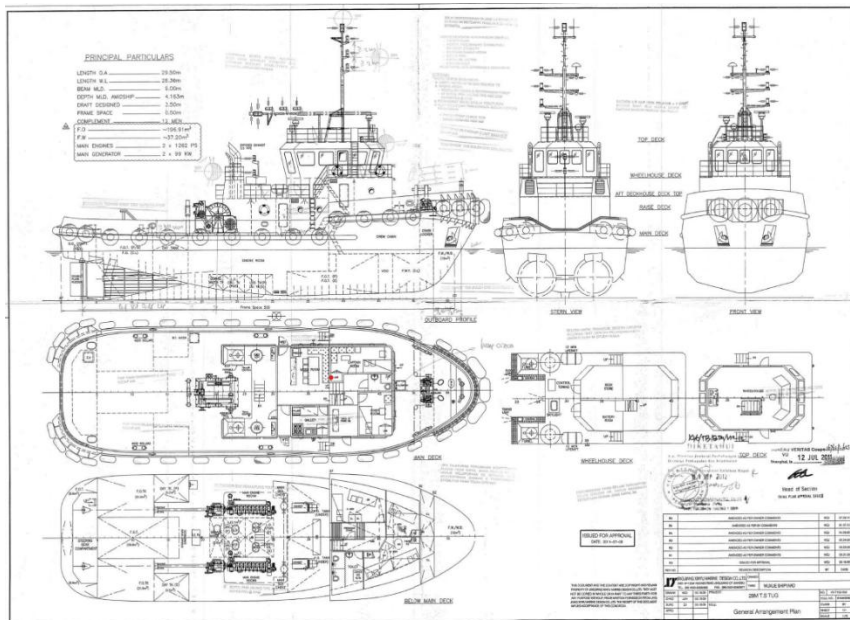
3.1 Objek Penelitian

3.1.1 Data Utama Kapal

Kapal yang digunakan pada penelitian ini menggunakan jenis kapal tugboat dengan ukuran utama kapal sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Ukuran Utama Kapal

No	Nama	Ukuran
1	LOA	29.50 M
2	LWL	28.36 M
3	H	4.163 M
4	B	9.00 M
5	T	3.5 M
6	Diameter shaft	6.5"
7	Panjang shaft	7.05 M
8	Panjang intermediate shaft	1.35 M



Gambar 3. 1 Rencana Umum
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

3.1.2 Spesifikasi Sistem Propulsi

Bagian ini menguraikan spesifikasi teknis dari sistem propulsi kapal tugboat yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian ini. Parameter fundamental seperti kondisi operasional poros, dimensi *stern tube*, dan karakteristik sistem pelumasan air sangat memengaruhi beban kerja mekanis

serta tingkat keandalan *EVK seal*. Rincian spesifikasi komponen propulsi ditunjukkan pada table dibawah ini.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Sistem Propulsi

Parameter	Spesifikasi / nilai	Satuan
<i>Propeller Shaft</i>		
Diameter Poros	6,5	Inch
Panjang poros	7,05	m
<i>Shaft liner</i>	stainless steel	
<i>Sistem Stern Tube</i>		
Diameter dalam	7	Inch
Diameter luar	8,25	Inch
Material	<i>Carbon steel</i>	
<i>Sistem Pelumasan dan Pendinginan</i>		
Tipe Pelumasan	<i>Open Water – Lubricated</i>	
Media pendingin	<i>Water</i>	

3.1.3 Spesifikasi EVK Seal

Spesifikasi teknis penyekat *EVK seal* yang menjadi objek utama dalam penelitian ini merupakan acuan dasar untuk mengevaluasi batasan operasional komponen. Data spesifikasi yang mencakup dimensi, material penyusun, dan parameter batas kerja sangat diperlukan untuk mengidentifikasi adanya penyimpangan (*deviasi*) antara kondisi ideal rancangan pabrikan dengan kondisi aktual saat kegagalan terjadi di lapangan. Rincian spesifikasi komponen *EVK seal* yang digunakan pada sistem poros baling-baling kapal *tugboat* ini diuraikan pada tabel berikut.

Tabel 3. 3 Spesifikasi EVK Seal

Parameter	Spesifikasi / Nilai	Satuan
<i>Identitas Komponen</i>		
<i>Manufacturer</i>	<i>Eagle Industry</i>	
Tipe	<i>EVK Water Lubricated</i>	
Diameter Nominal	165	mm

3.2 Alat dan Data Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian analisis kegagalan *EVK seal* ini, digunakan berbagai peralatan dan data pendukung untuk menunjang proses observasi lapangan serta pengolahan data menggunakan metode Root Cause Analysis. Rincian alat dan data yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mendukung proses pengamatan, pengukuran, pemeriksaan fisik, serta dokumentasi kondisi *EVK seal* dan sistem shaft propeller pada kapal *tugboat*. Adapun alat-alat yang digunakan meliputi alat ukur, alat inspeksi, serta alat bantu dokumentasi dan analisis. Alat ukur yang digunakan antara lain jangka sorong (*vernier caliper*) dan micrometer, yang berfungsi untuk mengukur dimensi *EVK seal*, diameter

shaft, serta tingkat keausan pada komponen seal. Selain itu, dial indicator digunakan untuk memeriksa keselarasan (alignment) dan kemungkinan terjadinya misalignment pada shaft propeller yang dapat mempengaruhi kinerja seal. Sebagai alat pendukung dokumentasi dan analisis, digunakan kamera digital atau kamera ponsel untuk merekam kondisi kerusakan seal dan area kebocoran sebagai data visual penelitian. Data teknis dan historis diperoleh melalui dokumen manual teknis, drawing sistem propulsi. Seluruh data yang diperoleh dari penggunaan alat-alat tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan metode analisis kerusakan dengan diagram fishbone untuk menentukan penyebab utama kerusakan EVK seal dan kebocoran sistem kekedapan shaft.

3.2.2 Data dan Bahan Penelitian

Dalam pelaksanaan investigasi berbasis *Root Cause Analysis* (RCA) terhadap kegagalan komponen *EVK seal* bahan utama yang digunakan untuk proses analisis bersumber dari pengumpulan data faktual di lapangan serta literatur pendukung. Pengumpulan data yang akurat dan komprehensif sangat diperlukan untuk merunut kronologi kegagalan dan mengidentifikasi akar permasalahan secara objektif. Data dan bahan penelitian ini diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Data primer merupakan sekumpulan informasi dan bukti empiris yang diperoleh secara langsung dari objek penelitian di lapangan saat kapal *tugboat* melakukan proses perbaikan (*docking*). Data primer yang digunakan dalam penelitian ini meliputi hasil observasi dan inspeksi fisik dan hasil wawancara operasional.

2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan dokumen teknis, catatan historis, dan standar literatur yang digunakan sebagai parameter pembandingan (kondisi ideal) terhadap kondisi aktual komponen yang rusak. Data sekunder yang menunjang penelitian ini mencakup manual pabrikan, regulasi standar klasifikasi, dan riwayat pemeliharaan kapal.

3.3 Tempat Pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian dilakukan di galangan kapal.

3.4 Metode Analisis Data

Tahapan analisis data merupakan inti dari pelaksanaan penelitian ini, di mana seluruh bukti fisik dan rekaman operasional dari kapal *tugboat* diolah secara sistematis untuk menemukan pemicu utama kegagalan *EVK seal*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Root Cause Analysis* (RCA). Pendekatan RCA dipilih karena kemampuannya dalam menelusuri rentetan anomali teknis secara deduktif, sehingga investigasi tidak berhenti pada gejala kerusakan fisik di permukaan (seperti kebocoran air), melainkan pada akar penyebab fundamental. Proses analisis data dengan metode RCA dalam penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan-tahapan yang terstruktur sebagai berikut.

3.4.1 Identifikasi Fenomena Kegagalan

Langkah pertama dalam analisis ini adalah mendefinisikan mode kegagalan yang terjadi pada *EVK seal*. Data historis operasional mesin, catatan penggantian suku cadang, dan hasil inspeksi keausan komponen ditabulasi. Untuk merekonstruksi kronologi kerusakan secara komprehensif, tabulasi data teknis tersebut dipadukan dengan ekstraksi informasi kualitatif yang diperoleh dari sejumlah responden kunci, seperti *Chief Engineer*, *Second Engineer*, dan teknisi galangan. Keterlibatan responden ahli ini sangat penting untuk memetakan kondisi empiris saat komponen beroperasi di bawah fluktuasi beban tarik *tugboat*.

3.4.2 Pemetaan Hubungan Sebab-Akibat

Setelah fenomena kegagalan didefinisikan, dilakukan penelusuran faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kerusakan tersebut. Analisis ini diuraikan menggunakan instrumen spesifik RCA, seperti *Fishbone Diagram* (Diagram Ishikawa) atau *5 Why Analysis*. Pemetaan difokuskan pada interaksi antarkomponen di dalam sistem *stern tube* berpelumas air, dengan mengevaluasi empat variabel utama:

1. Mesin
Memeriksa ada tidaknya ketidaksejajaran poros, getaran berlebih, atau keausan pada bantalan *stern tube* sisi luar yang membebani *EVK seal*.
2. Metode
Mengevaluasi prosedur perawatan dan kesesuaian teknik instalasi *seal* di sekat ruang mesin.
3. Material
Mengkaji kualitas fluida pendingin (air) dan potensi degradasi tegangan pada *garter spring* atau sobeknya polimer elastomer.
4. Manusia
Menganalisis ada tidaknya faktor *human error* dalam pemantauan parameter operasional poros.

3.4.3 Validasi dan Penentuan Akar Masalah

Dari pemetaan sebab-akibat beberapa hipotesis penyebab kegagalan akan mengerucut pada satu atau dua faktor paling fundamental. Faktor pemicu ini kemudian divalidasi keabsahannya dengan cara membandingkan deviasi parameter operasional aktual terhadap literatur standar yang berlaku. Konsensus dari para responden ahli juga digunakan pada tahap ini untuk memperkuat justifikasi teknis bahwa akar masalah yang ditemukan memang logis dan sesuai dengan realitas dinamika permesinan maritim.

3.4.4 Perumusan Tindakan Korektif dan Preventif

Tahap akhir dari analisis data ini adalah merumuskan solusi teknis yang tepat sasaran berdasarkan akar masalah yang telah divalidasi. Rekomendasi yang disusun tidak sekadar berupa tindakan perbaikan komponen yang rusak melainkan berupa desain strategi perawatan berkelanjutan. Tujuannya adalah untuk mengeliminasi faktor pemicu secara permanen guna

mencegah terulangnya insiden hilangnya kekedapan *EVK seal* di masa mendatang, sekaligus meningkatkan keandalan operasional sistem propulsi secara keseluruhan.

3.5 Variabel Penelitian

Dalam penelitian berbasis investigasi kegagalan mekanis menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) variabel penelitian tidak diuji secara statistik melainkan ditelusuri hubungan sebab-akibatnya secara logis dan deduktif. Pada konteks penelitian ini variabel penelitian direpresentasikan sebagai akibat dan sebab. Secara akademik variabel dalam penelitian ini diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu Variabel Terikat (*Dependent Variable*) dan Variabel Bebas (*Independent Variable*).

3.5.1 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah fenomena utama yang menjadi fokus observasi dan titik tolak dari investigasi RCA. Variabel ini merupakan hasil atau akibat dari suatu rantai kegagalan sistem.

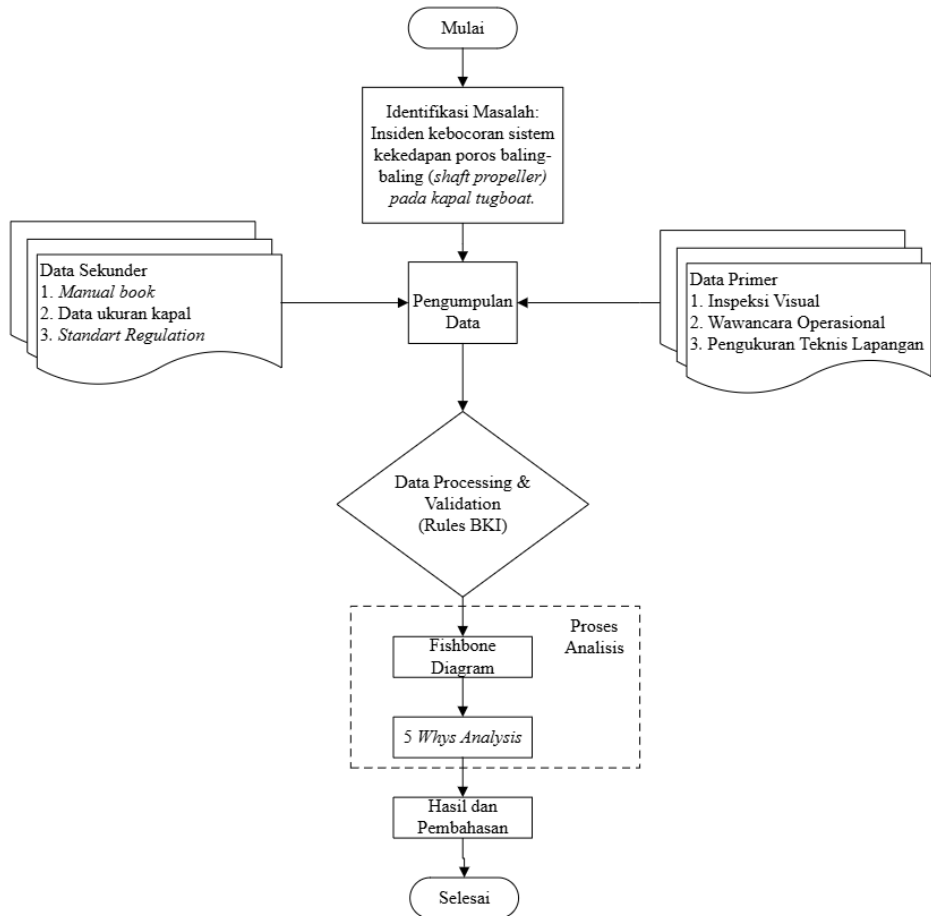
1. Kegagalan fungsi kekedapan *EVK seal* pada sistem *stern tube* berpelumas air di kapal *tugboat*.

3.5.2 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas dalam analisis RCA bertindak sebagai parameter operasional atau kondisi teknis yang memengaruhi variabel terikat. Variabel-variabel ini merepresentasikan potensi akar penyebab yang memicu rusaknya *EVK seal*. Mengacu pada pemetaan diagram sebab-akibat, variabel bebas yang diinvestigasi dalam penelitian ini meliputi:

1. Kondisi Keselarasan Poros
2. Kondisi Bantalan
3. Kondisi Media Pelumas
4. Beban Dinamis dan Getaran
5. Prosedur Perawatan dan Operasional

3.6 Flowchart



Gambar 3. 2 Flowchart
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

BAB IV PEMBAHASAN DAN PENELITIAN

4.1 Gambaran Umum Kegagalan Sistem dan Pengumpulan Data



Insiden kegagalan pada sistem kekedapan *tugboat* ini pertama kali teridentifikasi pada saat kapal beroperasi, di mana kru kamar mesin mendeteksi adanya peningkatan volume genangan air got secara tidak wajar. Pemeriksaan awal menunjukkan bahwa debit air tersebut bersumber dari area *stern tube* yang memberikan indikasi kuat hilangnya kemampuan *EVK seal* dalam menyekat fluida. Untuk mencegah kerusakan lebih lanjut, operasional kapal dihentikan sementara dan kapal ditarik menuju galangan untuk menjalani proses perbaikan di atas dok kering.

4.1.1 Kondisi EVK Seal dan Indikasi Kerusakan

Berdasarkan hasil observasi lapangan, ditemukan adanya indikasi kerusakan pada EVK seal yang menyebabkan sistem kekedapan shaft propeller tidak bekerja secara optimal. Kerusakan tersebut ditandai dengan adanya kebocoran pada area sekitar seal dan shaft propeller. Secara visual, kerusakan EVK seal dapat ditunjukkan melalui beberapa kondisi, seperti permukaan seal yang mengalami keausan, deformasi, retakan, atau perubahan bentuk akibat tekanan dan gesekan selama pengoperasian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seal tidak lagi mampu menjalankan fungsi penyekatan secara maksimal.

Tabel 4. 1 Kondisi dan indikasi kerusakan

No	Temuan Observasi	Kondisi yang Ditemukan	Dampak terhadap Sistem	Dokumentasi
1.	Kebocoran pada area shaft propeller	Terdapat rembesan fluida di sekitar seal	Sistem kekedapan menurun	 <p style="text-align: center;">Gambar 4. 1 Sistem pelumasan shaft (Sumber : Dokumentasi pribadi)</p>
2.	Terkikisnya material EVK seal	Permukaan seal terlihat aus/terkikis	Seal tidak menutup sempurna	 <p style="text-align: center;">Gambar 4. 2 Seal</p>

				(Sumber : Dokumentasi pribadi)
3.	Kerusakan pada o-ring	Didapatkan o-ring sobek	Terjadi celah kebocoran	 <p>Gambar 4. 3 O-ring (Sumber : Dokumentasi pribadi)</p>
4.	Kontaminasi area seal	Terdapat kotoran/debris pada area kerja	Mempercepat keausan seal	 <p>Gambar 4. 4 Kontaminasi area seal (Sumber : Dokumentasi pribadi)</p>

4.1.2 Pengukuran

1. Clearance

Berikut merupakan hasil dari pengecekan yang dilakukan untuk memastikan gap antara shaft propeller.

Tabel 4. 2 Clearance

Maksimal gap	0,01 D + 2,5	4,151 mm
Hasil pengecekan		
Belakang		
Atas	Bawah	Total
2,5	0	2,5
Kanan	Kiri	Total
2,3	2,7	5
Depan		
Atas	Bawah	Total

3	0	3
Kanan	Kiri	Total
2	2,5	4,5

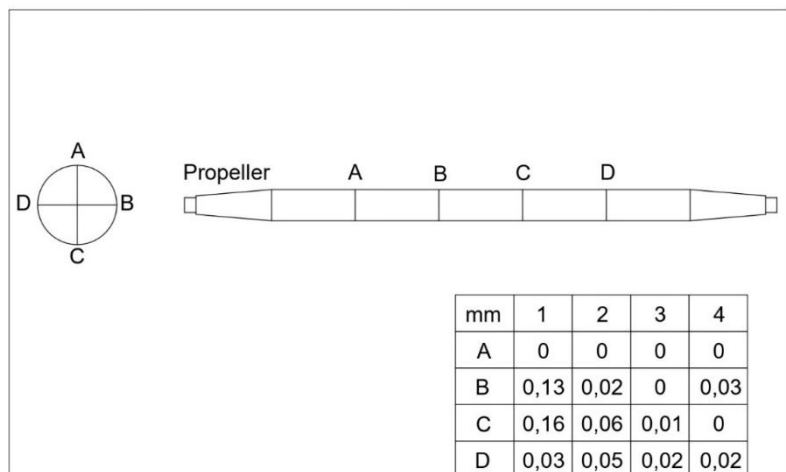
Lampiran gambar:

Belakang

Depan

Berdasarkan hasil Pengujian yang telah dilakukan ditemukan adanya celah yang melebihi ambang batas toleransi sebesar 1mm.

2. Kelurusan Shaft



Gambar 4. 5 Kelurusan shaft
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan hasil pengukuran dan inspeksi, parameter kelurusan poros baling-baling terkonfirmasi berada di dalam batas toleransi normal yang diizinkan. Kondisi poros yang stabil ini mengeliminasi hipotesis adanya tekanan mekanis asimetris atau vibrasi berlebih sebagai penyebab kerusakan.

4.1.3 Hasil Wawancara dan Observasi

Dalam penelitian ini telah dilakukan wawancara dengan kepala kamar mesin, *second engineer*, *project engineer*, serta *quality control* dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Hasil Ringkasan Wawancara

No	Fokus Pertanyaan	Ringkasan Jawaban	Kategori RCA	Tema Utama
1.	Kronologi & Waktu Kebocoran	Kebocoran tidak terjadi akibat insiden spesifik melainkan meningkat perlahan seiring waktu tepatnya beberapa hari setelah kapal beroperasi di perairan dangkal.	Mesin / Lingkungan	Waktu dan pemicu operasional
2.	Indikasi Fisik & Kerusakan	Saat dibongkar, ditemukan pengerasan material pada bibir <i>seal</i> , komponen <i>O-ring</i> terputus, serta terdapat indikasi <i>overheating</i> pada komponen.	Material	Degradasi termal & keausan material
3.	Kondisi Penyelarasan / <i>Alignment</i>	Secara keseluruhan tidak ditemukan adanya indikasi <i>misalignment</i> (ketidaksejajaran poros) dan housing. Namun, sebagian kru merasakan getaran sedikit meningkat seiring bertambahnya waktu pelayaran	Mesin	Operasional mekanis normal
4.	Kondisi Kelonggaran Bantalan	Dikonfirmasi bahwa saat pembongkaran dilakukan, nilai <i>clearance</i> (celah) pada bantalan poros (<i>bearing</i>)	Mesin	Keausan bantalan poros

		sudah melebihi batas toleransi maksimal.		
5.	Faktor Lingkungan Operasional	Kapal sebelumnya berlayar di perairan dangkal. Efeknya, ditemukan banyak endapan lumpur di sekitar area rumah <i>seal</i> , yang disepakati sebagai salah satu pemicu utama kerusakan.	Lingkungan	Kontaminasi lumpur / sedimen
6.	Prosedur Instalasi	Tahap pemasangan <i>seal</i> sebelumnya dipastikan sudah mengacu pada prosedur manual pabrikan (pembersihan, pemasangan <i>housing</i> , dan <i>seal ring</i>).	Metode	Pemasangan sesuai standar
7.	Pemeliharaan & Monitoring	Faktor teknis paling berpengaruh adalah kurangnya perawatan sistem pelumasan. Tidak ada pengecekan suhu/tekanan <i>seal</i> , dan inspeksi hanya sebatas pantauan visual jika terjadi genangan air.	Metode / Manusia	Kurangnya pemeliharaan preventif

Berdasarkan rangkaian pengumpulan data empiris yang meliputi inspeksi visual, pengujian dimensi teknis, dan wawancara mendalam dengan panel responden ahli dapat ditarik kesimpulan awal mengenai kondisi kegagalan sistem kekedapan poros baling-baling pada kapal *tugboat* ini. Dari aspek pemeriksaan fisik, ditemukan kerusakan material yang signifikan berupa pengerasan bibir polimer *EVK seal* dan terputusnya komponen penyekat sekunder (*O-ring*). Kondisi kerusakan fisik ini terkonfirmasi

berkaitan erat dengan temuan intrusi kontaminan berupa endapan lumpur pekat di area *housing seal*. Di sisi lain dari aspek pengujian teknis hasil pengukuran dimensi mengonfirmasi bahwa celah kelonggaran bantalan (*clearance bearing*) telah melampaui batas toleransi maksimal yang diizinkan oleh kelas klasifikasi. Kelonggaran ini memicu pergerakan poros yang eksentris dan tidak stabil meskipun hasil uji indikator *dial* memastikan bahwa kelurusan sumbu poros secara struktural (*shaft alignment*) pada awalnya masih berada dalam batas normal dan instalasi telah sesuai dengan panduan manual pabrikan.

Seluruh temuan kerusakan fisik dan anomali ukuran teknis tersebut menunjukkan korelasi yang sangat kuat dengan data historis operasional yang diperoleh dari hasil wawancara. Kebocoran sistem secara fundamental diakibatkan oleh rusaknya *EVK seal* yang dipicu oleh dua faktor utama yaitu gesekan dan getaran berlebih. Karakteristik operasional kapal di perairan dangkal yang tidak seimbang dengan prosedur pemeliharaan memadai telah memicu terbawanya sedimen lumpur masuk ke dalam tabung poros (*stern tube*), sedimen tersebut menempel pada area antarmuka *seal* dan *shaft* menciptakan efek gesekan abrasif yang sangat ekstrem saat poros berputar. Kedua efek destruktif ini diperparah oleh membesarnya celah antara *shaft* dan bantalan yang memicu timbulnya getaran berlebih secara dinamis. Kombinasi tegangan mekanis akibat getaran poros dan keausan abrasif dari partikel lumpur inilah yang secara langsung merusak struktur kimiawi material, membuat *seal* kehilangan daya kedapnya, dan berujung pada terjadinya kebocoran.

4.2 Hasil Analisis Kegagalan Sistem

Dari hasil wawancara dan pengujian dapat disimpulkan dengan penggunaan diagram *fishbone* dan analisis *5 whys*.

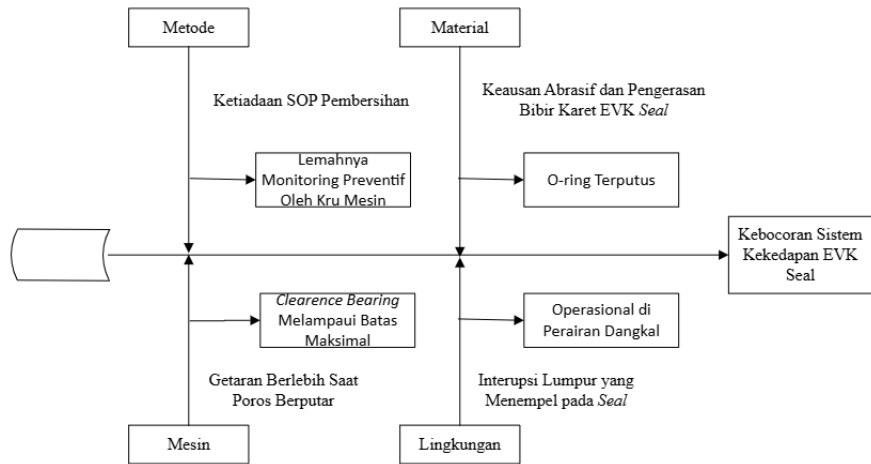
4.5.1 Diagram Fishbone

Berikut merupakan analisis menggunakan diagram fishbone untuk mengerucutkan akar penyebab.

Tabel 4. 4 Diagram Fishbone

Kategori	Detail penyebab
Material	Keausan abrasif dan pengerasan (<i>hardening</i>) pada material bibir karet <i>EVK seal</i> .
	Kerusakan fisik berupa terputusnya cincin penyekat sekunder (<i>O-ring</i>).
Mesin	Celah bantalan (<i>clearance bearing</i>) melampaui batas toleransi maksimal BKI.
	Timbulnya getaran berlebih (<i>excessive vibration</i>) pada <i>shaft propeller</i> saat beroperasi.
Lingkungan	Operasional intensif kapal <i>tugboat</i> di area perairan dangkal dan muara sungai.
	Intrusi (masuknya) endapan lumpur dan pasir yang menempel pada area antarmuka <i>seal</i> .
Metode	Ketiadaan instruksi kerja (SOP) untuk pembersihan/ <i>flushing</i> area poros pasca-operasi di perairan dangkal.

Lemahnya pengawasan (*monitoring*) preventif oleh personel karena hanya mengandalkan inspeksi visual reaktif saat terjadi genangan.



Gambar 4. 3 Diagram fishbone

4.5.2 Analisis 5 Whys

Berdasarkan integrasi antara data inspeksi fisik, pengukuran *clearance*, dan hasil wawancara operasional penelusuran logika sebab-akibat terhadap insiden kebocoran *EVK seal* diuraikan pada tabel berikut:

Tabel 4. 5 5 Whys

Tahap	Pertanyaan “whys”	Jawaban
Why 1	Mengapa <i>EVK seal</i> gagal menyekat air masuk ke ruang mesin?	Karena komponen <i>seal</i> kehilangan fungsi kekedapan. bibir elastomer mengalami pengerasan (<i>hardening</i>), cincin <i>O-ring</i> terputus, dan celah bantalan melebihi batas toleransi.
Why 2	Mengapa komponen material <i>seal</i> rusak dan bantalan terkikis secara bersamaan?	Karena area antarmuka kerja <i>seal</i> terpapar oleh gesekan abrasif serta getaran dinamis berlebih secara terus-menerus saat poros baling-baling berputar.
Why 3	Mengapa timbul gesekan abrasif dan getaran berlebih pada komponen tersebut?	Gesekan terjadi akibat masuknya kontaminasi partikel padat (sedimen lumpur) yang menempel langsung pada bibir <i>seal</i> . Getaran berlebih terjadi karena celah kelonggaran bantalan (<i>clearance bearing</i>)

		telah membesar hingga melampaui batas toleransi aturan BKL.
Why 4	Mengapa sedimen lumpur bisa masuk menempel pada <i>seal</i> dan mengapa keausan bantalan (<i>clearance</i>) dibiarkan melampaui batas?	Karena karakteristik operasional kapal <i>tugboat</i> yang intensif di perairan dangkal/muara tidak diimbangi dengan sistem pemeliharaan preventif yang ketat seperti prosedur pembilasan berkala serta pemantauan parameter mekanis.
Why 5	Mengapa sistem pemeliharaan preventif dan pengawasan tersebut tidak berjalan di atas kapal?	Ketiadaan <i>Standard Operating Procedure</i> (SOP) instruksi kerja khusus untuk pembersihan/pembilasan area poros pasca-operasi di perairan dangkal serta nihilnya manajemen kedisiplinan <i>Planned Maintenance System</i> (PMS) untuk pemantauan suhu dan tekanan) oleh kru kamar mesin.

4.3 Rekomendasi Teknis

Berdasarkan kesimpulan dari analisis akar permasalahan (*Root Cause Analysis*) yang mengidentifikasi bahwa kegagalan *EVK seal* disebabkan oleh keausan abrasif akibat menempelnya sedimen lumpur serta getaran dinamis akibat longgarnya celah bantalan. Maka dirumuskan sejumlah rekomendasi. Solusi yang diusulkan dibagi menjadi dua aspek yaitu tindakan perbaikan langsung (teknis fisik) dan perbaikan prosedur operasional (manajerial preventif).

4.4.1 Tindakan Perbaikan Langsung

Langkah pertama yang wajib dilakukan untuk memulihkan kelayakan operasi propulsi kapal *tugboat* adalah melaksanakan perbaikan fisik secara menyeluruh pada komponen yang terdegradasi. Rekomendasi perbaikan ini meliputi:

1. Penggantian Unit Komponen Penyekat
Melakukan penggantian unit *EVK seal* secara utuh serta penggantian seluruh cincin penyekat sekunder (*O-ring*), mengingat material lama telah mengalami pengerasan dan kehilangan sifat elastisitasnya secara permanen.
2. Penggantian Bantalan Tabung Poros
Mengingat hasil pengukuran menunjukkan nilai *clearance* telah melampaui batas toleransi keausan maksimal bantalan *stern tube* sisi luar wajib diganti dengan unit baru untuk mengembalikan stabilitas dan kelurusan titik tumpu poros.

4.4.2 Perbaikan Prosedur Operasional dan Pemeliharaan

Untuk mengurangi faktor pemicu secara permanen dan mencegah terulangnya insiden hilangnya kedapapan *EVK seal* harus dilakukan penerapan strategi pemeliharaan berkelanjutan:

1. Penyusunan *Standard Operating Procedure* (SOP)

Kru kapal wajib menyusun instruksi kerja atau SOP baru yang mewajibkan pelaksanaan prosedur pembilasan (*flushing*) area poros menggunakan air bersih bertekanan sesaat setelah kapal *tugboat* selesai beroperasi atau bermanuver di area perairan dangkal dan muara sungai yang bersedimen tinggi. Prosedur ini bertujuan untuk merontokkan partikel lumpur dan pasir sebelum sempat menempel dan mengendap di antarmuka *EVK seal*.

2. Optimalisasi *Planned Maintenance System* (PMS)

Agenda pemeliharaan sistem poros harus diterapkan secara ketat ke dalam PMS harian. Awak kapal diwajibkan melakukan pencatatan secara berkala ke dalam *logbook* untuk parameter suhu *seal* serta level getaran pada setiap pergantian jam jaga. Pemantauan data harian ini berfungsi sebagai instrumen deteksi dini, sehingga jika terjadi lonjakan getaran atau kenaikan suhu akibat degradasi bantalan kru mesin dapat bertindak secara proaktif sebelum terjadi kebocoran visual yang masif.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengumpulan data, inspeksi teknis di lapangan, serta penelusuran akar masalah menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) terhadap kerusakan *EVK seal* pada sistem kekedapan *shaft propeller* kapal *tugboat*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kebocoran pada *EVK seal* tidak diakibatkan oleh cacat mekanis bawaan pabrik atau kesalahan prosedur instalasi. Hal ini dibuktikan dari hasil pengukuran parameter kelurusan poros (*shaft alignment*) yang masih berada di dalam batas toleransi normal klasifikasi.
2. Insiden hilangnya fungsi kekedapan ini murni merupakan fenomena kegagalan beruntun yang dipicu oleh kombinasi dua faktor mekanis yang saling memperparah. Pertama, operasional kapal di perairan dangkal membawa material endapan lumpur yang menempel langsung pada antarmuka *seal*, memicu terjadinya gesekan abrasif yang sangat ekstrem. Kedua, efek destruktif ini diperparah oleh membesarnya celah bantalan (*clearance bearing*) hingga melampaui batas toleransi BKI yang memicu timbulnya getaran dinamis berlebih. Kombinasi antara gesekan partikel lumpur dan tegangan getaran inilah yang secara langsung merusak struktur material dan memutus komponen *O-ring*.
3. Berdasarkan analisis kausalitas *5 Whys* akar permasalahan utama (*root cause*) dari keseluruhan insiden ini adalah kelemahan pada sistem manajemen pemeliharaan. Ketiadaan instruksi kerja (*SOP*) untuk pembersihan dan pembilasan area poros pasca-operasi di perairan dangkal dipadukan dengan nihilnya kedisiplinan *Planned Maintenance System* (PMS) terhadap pemantauan parameter getaran dan suhu membuat anomali mekanis gagal dideteksi sejak dini oleh kru kapal.

5.2 Saran

Guna meningkatkan keandalan operasional kapal dan mencegah terulangnya insiden kebocoran *EVK seal* di masa mendatang terdapat beberapa rekomendasi teknis dan manajerial yang diusulkan antara lain:

1. Tindakan Perbaikan Fisik

Pihak galangan dan manajemen teknis wajib melakukan penggantian unit *EVK seal* dan *O-ring* secara utuh. Selain itu, penggantian bantalan *stern tube* (*bearing*) sisi luar mutlak harus dilakukan guna memulihkan nilai kelonggaran (*clearance*) kembali ke dalam batas toleransi BKI, sehingga getaran berlebih pada sumbu poros dapat dieliminasi

2. Pembuatan Instruksi Kerja (*SOP*) Khusus

Kru kapal perlu merumuskan *Standard Operating Procedure* (*SOP*) baru yang mewajibkan prosedur pembilasan (*flushing*) mekanis menggunakan air bertekanan di area antarmuka *seal* setiap kali kapal selesai beroperasi, bermanuver, atau bersandar di area perairan dangkal/muara yang bersedimen tinggi.

3. Penerapan *Planned Maintenance System* (PMS)

Awak kamar mesin harus meningkatkan kedisiplinan PMS dengan mewajibkan pencatatan metrik harian (*logbook*) terhadap level getaran dan suhu di area *stern tube*. Pemeliharaan sistem tidak boleh lagi hanya bergantung pada inspeksi visual secara reaktif (menunggu genangan air muncul), melainkan harus didasarkan pada pantauan parameter data operasional untuk deteksi dini.

DAFTAR PUSTAKA

- American Bureau of Shipping. (2018). *Rules for Building and Classing Marine Vessels: Part 4 Vessel Systems and Machinery*.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2022). *PERATURAN INSTALASI MESIN*. www.bki.co.id
- Borras, F. X., van den Nieuwendijk, R., Ramesh, V., de Rooij, M. B., & Schipper, D. J. (2021a). Stern tube seals operation: A practical approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1177/1687814021994404>
- Borras, F. X., van den Nieuwendijk, R., Ramesh, V., de Rooij, M. B., & Schipper, D. J. (2021b). Stern tube seals operation: A practical approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1177/1687814021994404>
- Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion*. [https://books.google.co.id/books?id=2drWDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=vGhq8yYOr3&dq=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20\(4th%20ed.\)&lr&pg=PP1#v=onepage&q=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20\(4th%20ed.\)&f=false](https://books.google.co.id/books?id=2drWDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=vGhq8yYOr3&dq=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20(4th%20ed.)&lr&pg=PP1#v=onepage&q=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20(4th%20ed.)&f=false)
- Carral Couce, L., Carral Couce, J. C., & Fraguera Formoso, J. Á. (2015). Operation and handling in escort tugboat manoeuvres with the aid of automatic towing winch systems. *Journal of Navigation*, 68(1), 71–88. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000435>
- DNV. (2016). *Machinery systems-general*. www.dnvgl.com.
- Doggett, A. M. (2005). *Root Cause Analysis: A Framework for Tool Selection* (Vol. 34, Number ©). www.asq.org
- Dong, C., Yuan, C., Bai, X., Yan, X., & Peng, Z. (2014). *Study on wear behaviour and wear model of nitrile butadiene rubber under water lubricated conditions*. <https://doi.org/10.1039/c0xx00000x>
- Ershadi, M. J., Aiasi, R., & Kazemi, S. (2018). Root cause analysis in quality problem solving of research information systems: a case study. In *Int. J. Productivity and Quality Management* (Vol. 24, Number 2).
- Kemel, Johnson. (2020). *STERN TUBE BEARING DENGAN PELUMASAN AIR*.
- Ketola, J., Roberts, K., Revelle, J. B., Stamatis, D. H., Schutta, J. T., Andersen, B., & Fagerhaug, T. (2006). *Root cause analysis: Simplified tools and techniques (2nd ed.)*. <http://qualitypress.asq.org>.
- Khonsari, M. M., & Booser, E. R. (2017). *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication, 3rd Edition*.
- Lee, J. ung, Jeong, B., & An, T. H. (2019). Investigation on effective support point of single stern tube bearing for marine propulsion shaft alignment. *Marine Structures*, 64, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.10.010>

- Litwin, W. (2009). Water-lubricated bearings of ship propeller shafts - Problems, experimental tests and theoretical investigations. *Polish Maritime Research*, 16(4), 41–49. <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0055-z>
- Mobley, R. K. (1999). *ROOT CAUSE FAILURE ANALYSIS*.
- Pelić, V., Mrakovčić, T., Radonja, R., & Račić, N. (2022). *Technical and Ecological Aspects of Water-lubricated Stern Tube Bearings*. 289–304.
- Pérez-Canosa, J. M., Orosa, J. A., Iglesias-Baniela, S., Vinagre-Rios, J., & López-Toirán, R. (2022). Research on the Identifying Parameters of Tugs Performance: A Review. In *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* (Vol. 09). www.ijiset.com
- Ramadhan, A. A., Sulistyorini, D., Khamdilah, A., Wilastari, S., & Pujiyanto, F. (2025). Analisis Kegagalan Simplex Seal Of Stern Tube Terhadap Sistem Pelumasan Shaft Propeller di Kapal MT. Kuang. In *Politeknik Bumi Akpelni Semarang* (Vol. 27, Number 2). www.e-journal.akpelni.ac.id,
- Rooney, J. J., & Vanden Heuvel, L. N. (2004). *Root Cause Analysis For Beginners*. www.asq.org
- Sitompul, M. A. (2024). Implementasi Metode Root Cause Analysis (RCA) untuk Mengendalikan Reject Produk NP Project di PT. XYZ. *Journal of Manufacturing in Industrial Engineering & Technology*, 3(2), 83–92. <https://doi.org/10.30651/mine-tech.v3i2.24157>
- SKF. (2017). *Simplex shaft components Data catalogue*.
- Taylor, D. A. (1996). *Introduction to marine engineering*.
- Viran, A., Mentş, A., Emniyeti, K., Müdürlüğü, G., & Üniversitesi, İ. T. (2021). *ASSESSMENT OF PROPULSION SYSTEMS PERFORMANCE IN TUGBOAT*.
- Wärtsilä. (2015). *Wärtsilä encyclopedia of ship technology*. Wärtsilä Corporation.
- Wilson, F. P., Larry, D. D., & Gaylord, F. A. (1993). *Root cause analysis: A tool for total quality management*.
- Wodtke, M., & Litwin, W. (2021). Water-lubricated stern tube bearing - experimental and theoretical investigations of thermal effects. *Tribology International*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106608>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Luaran (Jurnal Artikel)

ANALISIS PENYEBAB KERUSAKAN EVK SEAL TERHADAP KEBOCORAN SISTEM KEKEDAPAN SHAFT PROPELLER

Mohammad Apgar Alvaen Harsyardana¹, Zulfaidah Ariany²

^{1,2} Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Gubernur Mochtar, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275

*Email: alvacnappgar@gmail.com (10 pt)

Abstrak

Sebagai pendukung operasional pelabuhan, kapal tunda (tugboat) membutuhkan keandalan sistem kekedapan poros (EVK seal) untuk mencegah kebocoran air laut. Komponen ini rentan gagal dan berujung pada kebocoran ruang mesin. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar permasalahan kerusakan EVK seal pada stern tube berpelumas air dan merumuskan perbaikannya. Metode Root Cause Analysis (RCA) dengan Diagram Fishbone dan 5 Whys Analysis digunakan dalam penelitian ini dan didukung data inspeksi visual, pengukuran dimensi, dan wawancara operasional. Hasil penelitian menunjukkan kebocoran bukan akibat cacat bawaan atau instalasi melainkan dipicu operasional kapal di perairan dangkal. Endapan lumpur menempel pada antarmuka seal memicu gesekan abrasif. Hal ini diperparah oleh membesarnya celah bantalan (clearance bearing) melampaui toleransi BKI dan menimbulkan getaran dinamis berlebih. Kombinasi gesekan lumpur dan getaran tersebut mendegradasi penyekat, menyebabkan bibir seal mengeras dan O-ring terputus. Analisis 5 Whys menemukan akar masalah fundamental pada kelemahan manajemen perawatan, ketiadaan prosedur operasi standar (SOP) pembilasan (flushing) pasca-operasi di perairan dangkal, dan minimnya pemantauan terhadap parameter suhu dan getaran. Sebagai mitigasi, direkomendasikan penggantian komponen fisik secara menyeluruh, pembuatan SOP flushing area poros, dan optimalisasi Planned Maintenance System (PMS).

Kata kunci: EVK Seal, Stern Tube, Shaft Propeller, Root Cause Analysis, Tugboat.

Abstract

As a port operational support, tugboats require reliable shaft sealing systems (EVK seal) to prevent seawater leakage. This component is susceptible to failure, leading to leakage in the engine room. This study aims to identify the root cause of EVK seal degradation in a water-lubricated stern tube and to formulate its improvements. The Root Cause Analysis (RCA) method, utilizing Fishbone Diagram and 5 Whys Analysis, was applied in this research, supported by visual inspection, dimensional measurement, and operational interview data. The results indicate that the leakage was not caused by inherent defects or installation errors but was triggered by the vessel's operation in shallow waters. Mud sediment adhered to the seal interface, inducing abrasive friction. This condition was exacerbated by the enlargement of the bearing clearance beyond the BKI tolerance, causing excessive dynamic vibration. The combination of mud friction and vibration degraded the seal, causing the seal lip to harden and the O-ring to snap. The 5 Whys analysis revealed the fundamental root cause to be a deficiency in maintenance management: the absence of standard operating procedures (SOP) for post-operation flushing in shallow waters and minimal monitoring of temperature and vibration parameters. For mitigation, this study recommends a complete replacement of physical components, the development of a flushing SOP for the shaft area, and the optimization of the Planned Maintenance System (PMS).

Keywords: EVK Seal, Stern Tube, Shaft Propeller, Root Cause Analysis, Tugboat.

PENDAHULUAN

Kapal tunda (*tugboat*) memegang peranan krusial dalam operasional pelayaran dan pelabuhanan. Dengan karakteristik manuver dinamis dan daya tarik tinggi keandalan sistem propulsinya harus senantiasa dipastikan kinerjanya. Salah satu permasalahan utama yang sering mengancam kinerja sistem ini adalah kegagalan pada *stern tube* khususnya pada komponen penyekat poros yang bertugas mengisolasi perairan luar dan menahan kebocoran air laut masuk ke dalam ruang mesin (Carlton, 2018).

Pada sistem *stern tube* berpelumas air (*water-lubricated*), air diinjeksikan untuk menjalankan fungsi ganda sebagai media pelicin sekaligus penyerap panas (Wodtke & Litwin, 2021). Kinerja pelumas ini memiliki ketergantungan mutlak terhadap sistem kedekatan *seal* (Khonsari & Booser, 2017). Dalam praktiknya efektivitas operasional *EVK seal* sangat rentan terhadap kondisi operasional lingkungan, kualitas keselarasan poros (*alignment*), keausan bantalan (*bearing*), dan beban getaran (Borras et al., 2021). Jika komponen ini gagal air laut akan membanjiri ruang mesin dan melumpuhkan operasional propulsi kapal (American Bureau of Shipping, 2018).

Penelitian ini diambil dari kasus aktual di lapangan yaitu ditemukannya kebocoran masif pada sistem *stern tube* sebuah kapal tunda yang sedang menjalani perawatan di galangan kapal. Indikasi awal menunjukkan adanya genangan air dalam jumlah yang tidak wajar di area buritan ruang mesin. Meskipun penting, literatur empiris yang secara spesifik membedah mekanisme kerusakan pada varian *EVK seal* akibat profil operasi dinamis *tugboat* masih sangat terbatas, di mana penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada sistem pelumasan minyak seperti tipe *Simplex seal* (Ramadhan et al., 2025).

Untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) kerusakan komponen *EVK seal* secara komprehensif. Pendekatan yang digunakan adalah metode *Root Cause Analysis* (RCA). RCA diadaptasi karena menawarkan kerangka kerja analitis yang sistematis untuk mengidentifikasi akar permasalahan fundamental dari suatu kegagalan teknis (Sitompul, 2024), sehingga investigasi tidak hanya sekedar menangani gejala kerusakan di permukaan (Doggett, 2005). Melalui metode ini penelitian diharapkan dapat merumuskan

rekomendasi teknis perbaikan dan strategi perawatan yang tepat sasaran guna mencegah insiden serupa terulang kembali.

LANDASAN TEORI

Kapal Tunda

Kapal *tugboat* merupakan kapal kerja berukuran relatif kecil yang memiliki daya mesin serta kemampuan manuver yang sangat tinggi. Daya mesin kapal *tugboat* umumnya berada pada kisaran 500–2500 kW. Kapal ini dirancang secara khusus untuk mendorong, menarik, atau memandu kapal lain yang berukuran lebih besar, terutama pada kondisi operasi di area dengan ruang gerak terbatas seperti pelabuhan dan perairan dangkal. Salah satu karakteristik utama kapal *tugboat* adalah tingginya *bollard pull*, yaitu gaya tarik maksimum yang dapat dihasilkan oleh kapal dalam kondisi diam.

Sistem Pelumasan Shaft

Sistem pelumasan shaft propeller berfungsi untuk mengurangi gesekan, meminimalkan keausan, serta menjaga kestabilan kerja poros dan bantalan stern tube selama operasi. Sistem ini bekerja dengan membentuk lapisan fluida di antara permukaan poros dan bantalan sehingga mencegah terjadinya kontak logam ke logam.

Terdapat dua jenis pelumasan utama: sistem pelumasan minyak (*oil-lubricated*) yang bersirkulasi menopang beban poros, dan sistem pelumasan air (*water-lubricated*) yang menggunakan air laut atau tawar sebagai media pelumas sekaligus pendingin.

Sistem Kedekatan Shaft (Stern Tube Seal)

Sistem kedekatan *shaft propeller* berfungsi sebagai penghalang untuk mempertahankan pelumas di dalam *stern tube* dan sekaligus mencegah masuknya air laut ke dalam kapal.

Sistem ini bekerja menggunakan prinsip kontak elastomer terhadap permukaan shaft liner yang berputar secara kontinu dalam lingkungan laut yang agresif. Terdapat beberapa jenis sistem kedekatan shaft, yaitu:

1. Packing Seal

Sistem tradisional yang sederhana, menggunakan material packing (seperti *flax* atau *graphite*) yang ditekan secara mekanis menggunakan gland untuk menciptakan kedekatan.

2. Simplex Seal (*Lip Seal*)

Menggunakan satu atau beberapa cincin karet elastomer berbentuk bibir (*lip*) yang menempel langsung pada *shaft* karena ditekan oleh pegas (*garter spring*).

3. EVK Seal

Sistem kekedapan modern yang dirancang untuk operasi berat seperti pada kapal tugboat. Sistem ini menggunakan beberapa ring seal yang bekerja secara berurutan untuk menjaga kekedapan dan melindungi sistem pelumasan.

Inspeksi dan Pemeriksaan Teknis

1. Visual Inspection: Metode pemeriksaan fisik langsung yang bertujuan untuk mendeteksi dini indikasi kerusakan seperti kebocoran pelumas, kondisi fisik seal, korosi, serta perubahan warna akibat panas berlebih.
2. Clearance
Merupakan jarak celah yang terencana antara komponen mekanis. Celah yang terlalu kecil dapat memicu gesekan tinggi dan panas, sedangkan celah yang terlalu besar akan mengurangi kemampuan *seal* menahan fluida sehingga terjadi kebocoran.
3. Pemeriksaan Keselarasan Poros (*Alignment*)
Bertujuan memastikan poros berputar pada sumbu yang tepat. Ketidaksejajaran (*misalignment*) dapat meningkatkan gaya radial dan aksial pada *seal*, mempercepat keausan, dan memicu kebocoran.
4. Pemeriksaan Propeller
Meliputi identifikasi kerusakan visual (retak, deformasi) dan *balancing*, mengingat daun *propeller* yang tidak seimbang merupakan sumber utama getaran merusak bantalan dan *seal*.

Root Cause Analysis (RCA)

Root Cause Analysis (RCA) adalah suatu metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) dari suatu kegagalan atau kejadian yang tidak diinginkan. RCA berbeda dengan perbaikan reaktif karena pendekatannya bersifat proaktif, terstruktur, dan berbasis fakta untuk mengatasi penyebab dasar secara permanen.

Prinsip dasar metode ini meyakini bahwa mengoreksi gejala saja tidak akan

menyelesaikan masalah secara permanen, karena akar penyebab seringkali bersifat sistemik.

Tahapan utama dalam metode RCA meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data empiris, identifikasi faktor penyebab, analisis akar masalah, penyusunan tindakan korektif, serta monitoring.

< satu spasi >

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif berbasis investigasi kegagalan studi kasus (*case study*). Objek penelitian difokuskan pada unit *EVK Seal* spesifikasi nominal diameter 165 mm buatan *Eagle Industry* beserta sistem *shaft propeller* kapal *tugboat* dengan panjang kapal 29,50 meter yang sedang melakukan *docking* perbaikan.

1. Observasi Lapangan

Inspeksi visual langsung terhadap kondisi operasional, kebersihan area kerja, dan komponen sistem kekedapan *shaft propeller*.

2. Pengukuran Teknis

Penggunaan *vernier caliper* dan *dial indicator* untuk memeriksa *clearance* (celah) bantalan serta keselarasan (*alignment*) poros baling-baling.

3. Wawancara Mendalam

Dilakukan kepada narasumber kunci (*Chief Engineer*, *Second Engineer*, *Project Engineer*, dan *Quality Control*) terkait riwayat operasional, prosedur pemasangan, dan pola perawatan.

Data empiris yang terkumpul kemudian diolah secara deduktif menggunakan metode analisis RCA. Tahapan RCA dilakukan dengan memetakan faktor-faktor kontributor kerusakan ke dalam empat variabel utama (*Machine*, *Material*, *Environment*, *Man/Method*) menggunakan Diagram Fishbone, kemudian ditelusuri rantai kausalitasnya hingga ke akar fundamental menggunakan metode analisis 5 Whys (Doggett, 2005).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temuan Inspeksi dan Pengukuran Lapangan,

Berdasarkan observasi di lapangan saat pembongkaran *stern tube*, ditemukan kondisi *EVK seal* yang mengalami kerusakan fisik

signifikan. Bibir elastomer *seal* mengalami pengerasan parah (*hardening*) dan kehilangan elastisitasnya, sementara cincin penyekat sekunder (*O-ring*) ditemukan dalam kondisi terputus. Fenomena pengerasan elastomer ini sejalan dengan karakteristik degradasi termal akibat gesekan berlebih yang juga ditemukan pada studi kegagalan *seal* sebelumnya (Ramadhan et al., 2025). Selain itu, ditemukan penumpukan endapan lumpur pekat di sekitar area kerja *housing seal*, yang terkonfirmasi berkaitan dengan riwayat pelayaran kapal secara intensif di perairan dangkal dan muara bersedimen tinggi.

Guna memvalidasi penyebab kerusakan fisik tersebut, dilakukan pengujian mekanis. Pengujian kelurusan poros menggunakan *dial indicator* menunjukkan bahwa *shaft alignment* berada dalam batas normal dan tidak terjadi *misalignment*. Namun, pengujian *clearance bearing* (kelonggaran celah bantalan) menunjukkan kelonggaran yang telah melebihi batas toleransi yang diatur oleh klas dengan rumus $(0,01 \times \text{Diameter shaft}) + 2,5$ (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil Pengukuran Clearance Bantalan

Bantalan belakang		
Atas	Bawah	Total
2,5	0	2,5
Kanan	Kiri	
2,3	2,7	5
Bantalan depan		
Atas	Bawah	Total
3	0	3
Kanan	Kiri	
2	2,5	4,5

Hasil ukur pada Tabel 1 menegaskan bahwa kelonggaran celah bantalan (*clearance*) telah melampaui batas toleransi yang diatur oleh klas. Bantalan yang terlalu longgar mengakibatkan poros berputar secara eksentris, tidak stabil, dan membangkitkan gaya getaran (*vibration*) dinamis berlebih pada *shaft propeller* saat kapal bermanuver (Carlton, 2018).

Wawancara

Untuk memperkuat temuan fisik dan teknis tersebut, dilakukan wawancara mendalam dengan empat personel kunci, yaitu *Chief Engineer*, *Second Engineer*, *Project Engineer*, dan bagian *Quality Control*. Kompilasi konsensus dari wawancara tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Wawancara

Fokus Investigasi	Jawaban Responden	Identifikasi Faktor
Kronologi & Lingkungan	Kebocoran meningkat perlahan beberapa hari setelah kapal intensif beroperasi di perairan dangkal bersedimen tinggi.	Lingkungan operasional ekstrem
Penyelarasan & Getaran	Tidak ditemukan ketidaksejajaran poros, namun seluruh kru merasakan getaran mesin sedikit meningkat seiring bertambahnya waktu berlayar.	Indikasi anomali dinamis (getaran)
Pemeliharaan (Maintenance)	Tidak ada jadwal pembersihan filter pasokan air, nihilnya pengecekan suhu/tekanan poros, dan ketiadaan SOP khusus untuk prosedur pembilasan pasca-operasi.	Kelemahan manajemen perawatan

Hasil wawancara pada Tabel 2 mengonfirmasi bahwa kerusakan *seal* memiliki korelasi kuat dengan faktor eksternal (lingkungan dangkal) yang sayangnya tidak dimitigasi oleh sistem perawatan preventif yang memadai di atas kapal.

Hasil Analisis 5 Whys

Untuk memastikan solusi perbaikan menasar akar masalah utama, pemetaan dari *Fishbone* ditelusuri secara iteratif menggunakan pendekatan 5 *Whys* seperti diuraikan di bawah ini:

Tahap	Pertanyaan "Whys"	Jawaban
Why 1	Mengapa sistem kekedapan	Karena <i>EVK seal</i> kehilangan

	poros mengalami kebocoran masif?	fungsinya akibat pengerasan material elastomer (<i>hardening</i>) dan terputusnya cincin penyekat sekunder (<i>O-ring</i>).			dengan prosedur perawatan responsif seperti tindakan pembilasan (<i>flushing</i>) area poros setelah berlayar.
Why 2	Mengapa material <i>seal</i> tersebut bisa rusak dan terdegradasi?	Karena area antarmuka kerja <i>seal</i> terpapar gesekan abrasif yang ekstrem dan getaran dinamis secara terus-menerus.	Why 5	Mengapa tindakan perawatan responsif dan pengawasan tersebut tidak berjalan?	Karena lemahnya manajemen operasional perawatan di atas kapal (<i>maintenance management deficiency</i>). Tidak adanya <i>Standard Operating Procedure</i> (SOP) baku tentang pembilasan permesinan pasca-operasi dangkal, serta nihilnya kedisiplinan kru dalam menjalankan <i>Planned Maintenance System</i> (PMS) untuk mencatat parameter getaran dan suhu harian secara proaktif.
Why 3	Mengapa timbul gesekan ekstrem dan getaran berlebih pada poros?	Gesekan abrasif dipicu oleh intrusi partikel padat (sedimen lumpur) yang menempel langsung pada <i>seal</i> . Di sisi lain, getaran berlebih timbul karena bantalan penumpu poros telah aus hingga celahnya (<i>clearance</i>) melampaui batas toleransi BKI.			
Why 4	Mengapa sedimen lumpur bisa menempel dan keausan bantalan dibiarkan membesar?	Karena riwayat operasional kapal di perairan dangkal yang bersedimen tinggi tidak diimbangi			

Analisis Diagram *Fishbone*

Seluruh data hasil inspeksi mekanis dan konsensus wawancara ahli dirangkum dan dipetakan ke dalam Diagram *Fishbone* guna mengkategorikan potensi penyebab kegagalan berdasarkan empat elemen utama.

Tabel 3. Pemetaan Faktor Penyebab

Kategori RCA	Deskripsi Penyebab Teridentifikasi di Lapangan
Material	Keausan abrasif dan pengerasan (<i>hardening</i>) bibir karet <i>EVK seal</i> .
	Kerusakan fisik (<i>O-ring</i> terputus akibat gesekan ekstra).
Mesin	Celah bantalan (<i>clearance bearing</i>) melampaui ambang batas BKI.
	Timbulnya getaran berlebih (<i>excessive vibration</i>) pada poros.
Lingkungan	Operasional intensif kapal <i>tugboat</i> di perairan dangkal.
	Intrusi sedimen lumpur/pasir yang menempel pada antarmuka <i>seal</i> .
Metode & Manusia	Ketiadaan instruksi kerja (<i>SOP</i>) untuk pembersihan lumpur area poros.
	Kelemahan sistem <i>monitoring</i> preventif suhu dan getaran oleh kru.

Dengan data yang diperoleh dalam wawancara lima mengapa dan pemetaan faktor penyebab dapat disimpulkan melalui pengelompokan seperti pada (tabel 3) dan ditemukan diagram tulang ikan seperti Gambar 1 Diagram Tulang Ikan Retak kepala silinder



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi RCA, dapat disimpulkan bahwa kebocoran pada sistem kekedapan *EVK seal* kapal *tugboat* tidak disebabkan oleh cacat bawaan mekanis pabrik

atau kesalahan instalasi (*misalignment*). Insiden ini murni merupakan fenomena kegagalan beruntun yang dipicu oleh dua faktor destruktif utama. Pertama, intrusi endapan lumpur dari perairan dangkal yang menempel pada *seal* dan menciptakan gaya gesekan abrasif ekstrem. Kedua, efek gesekan ini diperparah oleh tegangan mekanis akibat getaran dinamis berlebih yang dibangkitkan oleh longgarnya kelonggaran bantalan (*clearance bearing*) hingga 5 mm (melampaui toleransi klasifikasi BKI sebesar 4,15 mm). Penelusuran 5 *Whys* membuktikan bahwa akar permasalahan fundamental bermuara pada *systemic failure* manajemen pemeliharaan, yaitu ketiadaan SOP pembersihan area poros dan lemahnya penerapan *Planned Maintenance System* (PMS) yang hanya mengandalkan pengecekan visual reaktif.

DAFTAR PUSTAKA

- American Bureau of Shipping. (2018). *Rules for Building and Classing Marine Vessels: Part 4 Vessel Systems and Machinery*.
- Borras, F. X., van den Nieuwendijk, R., Ramesh, V., de Rooij, M. B., & Schipper, D. J. (2021). Stern tube seals operation: A practical approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1177/1687814021994404>
- Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion*. [https://books.google.co.id/books?id=2drWDgAAQBAJ&pg=PP1&ots=vGhq8yYOr3&dq=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20\(4th%20ed.\)&lr&pg=PP1#v=onepage&q=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20\(4th%20ed.\)&f=false](https://books.google.co.id/books?id=2drWDgAAQBAJ&pg=PP1&ots=vGhq8yYOr3&dq=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20(4th%20ed.)&lr&pg=PP1#v=onepage&q=Marine%20Propellers%20and%20Propulsion%20(4th%20ed.)&f=false)
- Doggett, A. M. (2005). *Root Cause Analysis: A Framework for Tool Selection* (Vol. 34, Number ©). www.asq.org
- Khonsari, M. M., & Booser, E. R. (2017). *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication, 3rd Edition*.
- Ramadhan, A. A., Sulistyorini, D., Khamdilah, A., Wilastari, S., & Pujiyanto, F. (2025).

Analisis Kegagalan Simplex Seal Of Stern Tube Terhadap Sistem Pelumasan Shaft Propeller di Kapal MT. Kuang. In *Politeknik Bumi Akpelni Semarang* (Vol. 27, Number 2). www.e-journal.akpelni.ac.id,

Sitompul, M. A. (2024). Implementasi Metode Root Cause Analysis (RCA) untuk Mengendalikan Reject Produk NP Project di PT. XYZ. *Journal of Manufacturing in Industrial Engineering & Technology*, 3(2), 83–92.

<https://doi.org/10.30651/mine-tech.v3i2.24157>

Wodtke, M., & Litwin, W. (2021). Water-lubricated stern tube bearing - experimental and theoretical investigations of thermal effects. *Tribology International*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106608>

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 2. Surat Serah Terima Artikel Ilmiah

SURAT SERAH TERIMA PAPER ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Mohammad Apgar Alvaen Harsyawardana
NIM : 40040422650017
Program Studi : Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Judul Paper : ANALISIS PENYEBAB KERUSAKAN EVK SEAL
TERHADAP KEBOCORAN SISTEM KEKEDAPAN SHAFT
PROPELLER

Dengan ini menyatakan telah menyerahkan naskah paper ilmiah kepada:

Nama Dosen Pembimbing/Penerima : Dr. Zulfaidah Ariany, S.T., M.T.

Institusi : Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro.

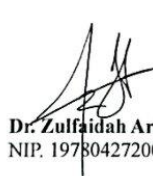
Paper tersebut digunakan untuk keperluan publikasi ilmiah dengan susunan penulis:

1. Penulis Pertama : Mohammad Apgar Alvaen Harsyawardana
2. Penulis Kedua : Dr. Zulfaidah Ariany, S.T., M.T.

Kami menyatakan bahwa susunan penulis telah disepakati bersama dan paper telah diterima serta disetujui untuk diproses sesuai ketentuan akademik yang berlaku dan mengikuti perkembangan terbaru. *Jika terjadi perubahan sesuai perkembangan ter-update, kami tidak keberatan.*
Surat ini dapat ditambahkan materai dan digunakan untuk jurnal nasional/internasional, konferensi, maupun arsip program studi.

Semarang, 29 Juni 2026

Dosen Penerima


Dr. Zulfaidah Ariany, S.T., M.T.
NIP. 197804272005012001

Mahasiswa


Mohammad Apgar Alvaen Harsyaward:
NIM. 40040422650002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 3. Bukti Submit Jurnal

The screenshot shows the 'Submit an Article' page on the Majalah Ilmiah Gema Maritim website. The page is in the '5. Next Steps' stage of a 5-step process. The main heading is 'Submission complete'. The text reads: 'Thank you for your interest in publishing with Majalah Ilmiah Gema Maritim.' Below this, under the heading 'What Happens Next?', it states: 'The journal has been notified of your submission, and you've been emailed a confirmation for your records. Once the editor has reviewed the submission, they will contact you.' For now, the user can perform three actions: 'Review this submission', 'Create a new submission', and 'Return to your dashboard', each with a blue link.

Majalah Ilmiah Gema Maritim Tasks 0 English View Site apgar

Majalah Ilmiah Gema Maritim

Submissions

Submit an Article

1. Start 2. Upload Submission 3. Enter Metadata 4. Confirmation 5. Next Steps

Submission complete

Thank you for your interest in publishing with Majalah Ilmiah Gema Maritim.

What Happens Next?

The journal has been notified of your submission, and you've been emailed a confirmation for your records. Once the editor has reviewed the submission, they will contact you.

For now, you can:

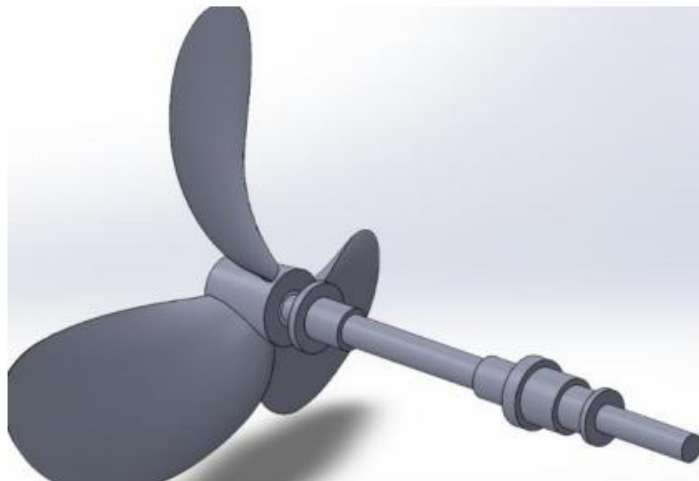
- [Review this submission](#)
- [Create a new submission](#)
- [Return to your dashboard](#)

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 4. Luaran (Modul)



Modul
Permodelan 3D dan *Alignment*
***Stern Tube System* Menggunakan**
AutoCAD



Mohammad Apgar Alvaen Harsyardana
Dr. Zulfaidah Ariany S.T., M.T.

TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

2026

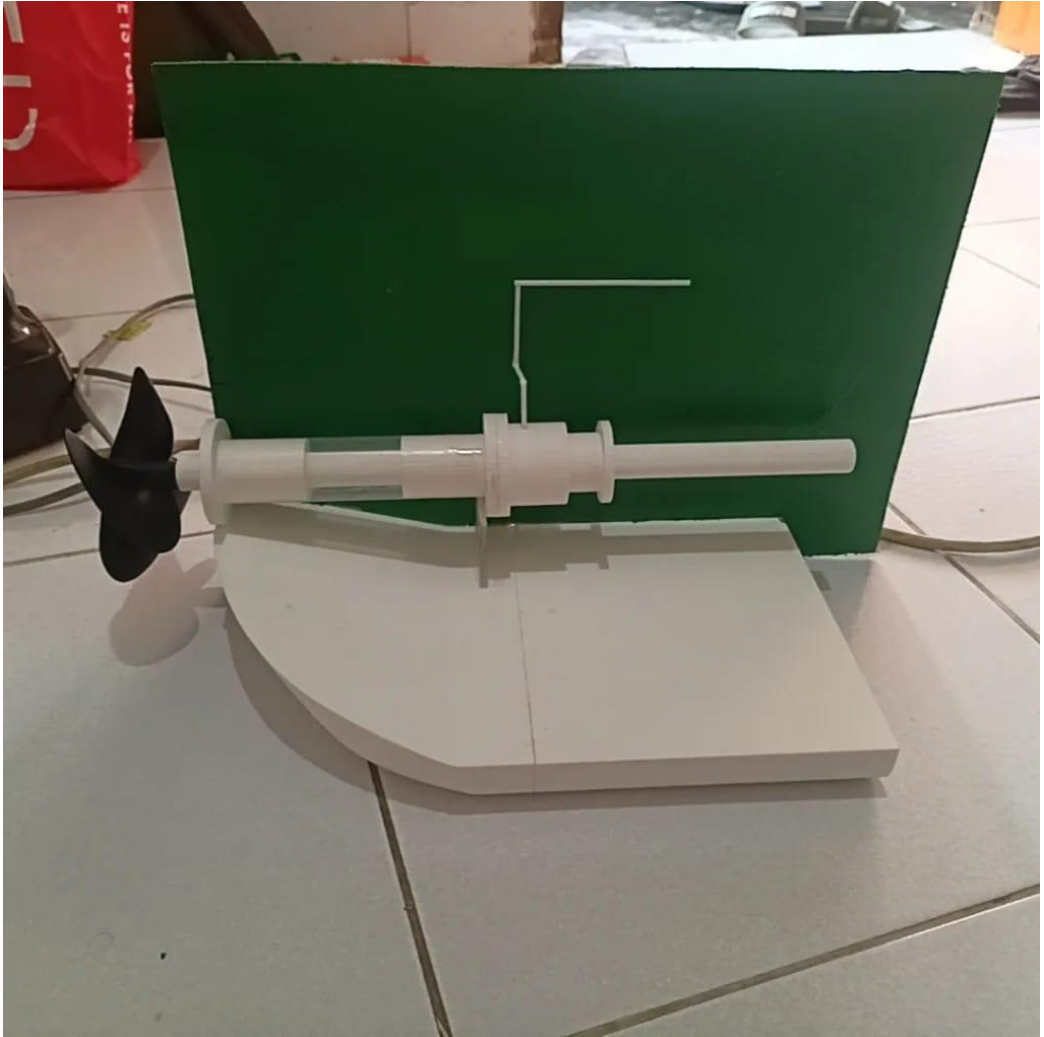
Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 5. Bukti Pendaftaran Hak Cipta



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 6. Luaran (*Prototype Stern Tube System*)



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 7. Berita Acara Serah Terima Barang



KEMENTERIAN PENDIDIKAN , KEBUDAYAAN ,
RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA
KONSTRUKSI PERKAPALAN

Jalan Prof. Sudarto, S.H.
Tembalang Semarang KodePos 50275
Tel.Faks. (024) 7471379
www.vokasi.undip.ac.id | email: vokasi@undip.ac.id

BERITA ACARA SERAH TERIMA BARANG

Pada hari ini Senin Tanggal 25 Bulan Juni Tahun 2026 Kami yang bertanda tangan dibawah ini:

1. Nama : Mohammad Apgar Alvaen Harsyawardana
NIM : 40040422650017
Jabatan : Mahasiswa
Selanjutnya disebut pihak yang menyerahkan PIHAK PERTAMA
2. Nama : Samuel Febriary Khristyson, S.T.
NIP : H.7.199202282022101001
Jabatan : Teknisi Laboratorium
Selanjutnya disebut pihak yang menerima PIHAK KEDUA

PIHAK PERTAMA menyerahkan kepada PIHAK KEDUA Sistem Pipa Muatan Kapal Tanker dengan rincian sebagai berikut:

No	Nama Barang	Jumlah (Unit)	Jumlah (Unit) yang diterima	Kondisi	Ket
1.	Prototype Stern tube water cooling system	1	1	Baik	lengkap

Demikian Berita Acara Serah Terima Barang ini untuk digunakan sebagai mana mestinya.

Semarang, 25 Juni 2026
Ketua Prodi STR – TRKP SV
Undip,

Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.
NIP 197008271999031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 8. Hasil Turnitin

1_TA_MOHAMMAD APGAR ALVAEN H -.docx

ORIGINALITY REPORT

8%

SIMILARITY INDEX

8%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

4%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

repository.unissula.ac.id

Internet Source

<1 %

2

digilib.unila.ac.id

Internet Source

<1 %

3

repository.unas.ac.id

Internet Source

<1 %

4

eprints.uad.ac.id

Internet Source

<1 %

5

docplayer.info

Internet Source

<1 %

6

repository.umsu.ac.id

Internet Source

<1 %

7

Submitted to UPN Veteran Yogyakarta

Student Paper

<1 %

8

repository.nscpolteksby.ac.id

Internet Source

<1 %

9

repository.ustjogja.ac.id

Internet Source

<1 %

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 9. Hasil Wawancara dan Bukti Wawancara

A. Chief Engineer

No	Pertanyaan	Jawaban
1.	Sejak kapan seal tersebut mulai digunakan?	Satu tahun sebelum terjadinya kebocoran
2.	Kapan pertama kali kebocoran yang terjadi (kontinu, sesekali, meningkat seiring waktu)?	Meningkat seiring waktu
3.	Apakah kebocoran terjadi setelah peristiwa tertentu (docking, overhaul, grounding, perubahan operasi)?	Tidak, kebocoran terjadi begitu saja saat kapal beroperasi
4.	Berdasarkan inspeksi, kerusakan apa yang terlihat pada seal? - Aus tidak merata - Kerusakan o-ring - Overheating	Kerusakan yang terjadi adalah putusnya o-ring dan juga terdapat overheating pada seal.
5.	Apakah ditemukan indikasi misalignment antara shaft propeller dan housing seal?	Tidak ada misalignment yang terjadi.
6.	Apa faktor teknis yang paling berpengaruh terhadap kerusakan seal tersebut?	Perawatan yang kurang terhadap sistem pelumasan shaft propeller.
7.	Bagaimana prosedur pemasangan seal yang diterapkan?	Tahap pemasangan dimulai dari pembersihan, pemasangan housing seal, pemasangan seal ring.
8.	Apakah pemasangan dilakukan mengacu pada manual pabrikan?	Iya pemasangan dilakukan sesuai dengan manual pabrikan
9.	Bagaimana jadwal perawatan dan inspeksi seal selama kapal beroperasi?	Tidak ada perawatan dan dilakukan inspeksi kebocoran secara visual saja.
10.	Apakah pernah dilakukan perbaikan sementara sebelum pergantian seal?	Tidak pernah
11.	Apakah temperatur atau tekanan pada sistem seal pernah melebihi kondisi normal?	Tidak pernah ada pengecekan
12.	Apakah pernah terjadi getaran berlebih pada shaft propeller?	Tidak ada
13.	Berapa nilai clearance (celah) pada bearing saat pembongkaran dilakukan?	Nilai clearance sudah melebihi batas toleransi
14.	Setelah dibongkar, bagaimana kondisi fisik bibir seal? Apakah terdapat goresan, pengerasan material, atau sobekan?	Didapat pengerasan material

15.	Saat pembongkaran, apakah ditemukan endapan lumpur atau pasir di dalam rumah <i>seal</i> ?	Terdapat endapan lumpur disekitar area <i>seal</i> yang dimana lumpur tersebut menjadi salah satu penyebab kerusakan <i>seal</i> .
16.	Apakah sebelumnya kapal berlayar diperairan dangkal?	Kapal sebelumnya berlayar di perairan dangkal.
17.	Apakah terdapat jadwal pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter (<i>strainer</i>) pada jalur suplai sistem <i>flushing</i> /pengairan menuju <i>stern tube</i> , dan apakah jadwal tersebut dijalankan secara konsisten?	Tidak ada jadwal untuk pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter pada jalur suplai.

Bukti wawancara:



B. *Second Engineer*

No	Pertanyaan	Jawaban
1.	Sejak kapan seal tersebut mulai digunakan?	-
2.	Kapan pertama kali kebocoran yang terjadi (kontinu, sesekali, meningkat seiring waktu)?	Meningkat seiring waktu
3.	Apakah kebocoran terjadi setelah peristiwa tertentu (docking, overhaul, grounding, perubahan operasi)?	Tidak, kebocoran terjadi beberapa hari setelah kapal beroperasi di perairan dangkal.

4.	Berdasarkan inspeksi, kerusakan apa yang terlihat pada seal? - Aus tidak merata - Kerusakan o-ring - Overheating	Kerusakan yang terjadi adalah putusnya o-ring dan juga terdapat overheating pada seal.
5.	Apakah ditemukan indikasi misalignment antara shaft propeller dan housing seal?	Tidak ada indikasi misalignment yang terjadi.
6.	Apa faktor teknis yang paling berpengaruh terhadap kerusakan seal tersebut?	Perawatan yang kurang terhadap sistem pelumasan shaft propeller.
7.	Bagaimana prosedur pemasangan seal yang diterapkan?	Tahap pemasangan dimulai dari pembersihan, pemasangan housing seal, pemasangan seal ring.
8.	Apakah pemasangan dilakukan mengacu pada manual pabrikan?	Iya pemasangan dilakukan sesuai dengan manual pabrikan
9.	Bagaimana jadwal perawatan dan inspeksi seal selama kapal beroperasi?	Tidak ada perawatan dan dilakukan inspeksi kebocoran secara visual saja.
10.	Apakah pernah dilakukan perbaikan sementara sebelum pergantian seal?	Tidak pernah.
11.	Apakah temperatur atau tekanan pada sistem seal pernah melebihi kondisi normal?	Selama ini tidak pernah ada tindakan pengecekan.
12.	Apakah pernah terjadi getaran berlebih pada shaft propeller?	Getaran sedikit meningkat seiring waktu berlayar.
13.	Berapa nilai clearance (celah) pada bearing saat pembongkaran dilakukan?	Nilai clearance sudah melebihi batas toleransi.
14.	Setelah dibongkar, bagaimana kondisi fisik bibir seal? Apakah terdapat goresan, pengerasan material, atau sobekan?	Didapat pengerasan material.
15.	Saat pembongkaran, apakah ditemukan endapan lumpur atau pasir di dalam rumah seal?	Terdapat endapan lumpur disekitar area seal yang dimana lumpur tersebut menjadi salah satu penyebab kerusakan seal.
16.	Apakah sebelumnya kapal berlayar diperairan dangkal?	Kapal sebelumnya berlayar di perairan dangkal.
17.	Apakah terdapat jadwal pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter (<i>strainer</i>) pada jalur suplai sistem <i>flushing</i> /pengairan menuju <i>stern tube</i> , dan apakah jadwal tersebut dijalankan secara konsisten?	Tidak ada jadwal untuk pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter pada jalur suplai.

Bukti wawancara:

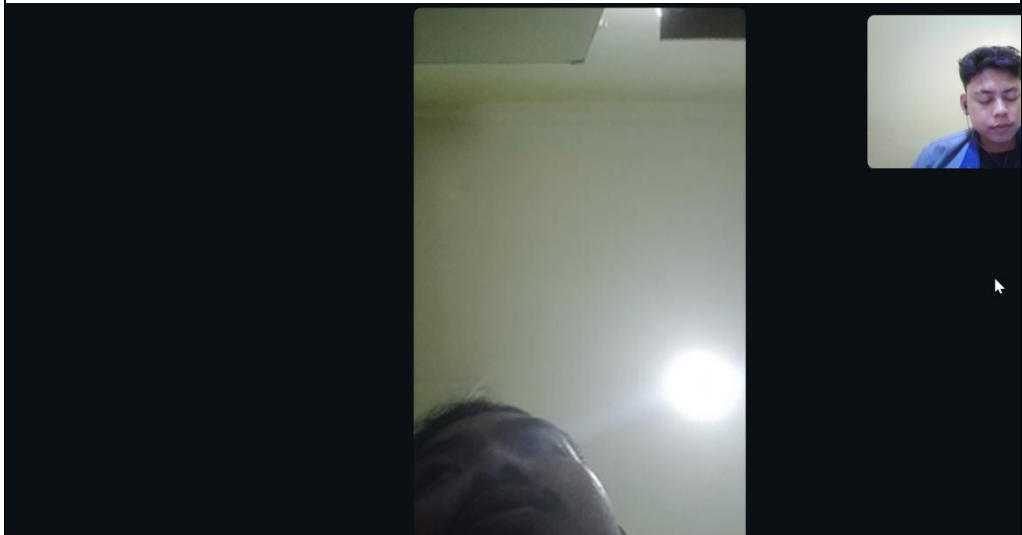


C. Project Engineer

No	Pertanyaan	Jawaban
1.	Berdasarkan inspeksi, kerusakan apa yang terlihat pada seal? - Aus tidak merata - Kerusakan o-ring - Overheating	Kerusakan yang terjadi adalah putusnya o-ring dan juga terdapat overheating pada seal.
2.	Apakah ditemukan indikasi misalignment antara shaft propeller dan housing seal?	Tidak ada indikasi misalignment yang terjadi.
3.	Apa faktor teknis yang paling berpengaruh terhadap kerusakan seal tersebut?	Perawatan yang kurang terhadap sistem pelumasan shaft propeller.
4.	Bagaimana prosedur pemasangan seal yang diterapkan?	Tahap pemasangan dimulai dari pembersihan, pemasangan housing seal, pemasangan seal ring.
5.	Apakah temperatur atau tekanan pada sistem seal pernah melebihi kondisi normal?	Selama ini tidak pernah ada tindakan pengecekan.
6.	Apakah pernah terjadi getaran berlebih pada shaft propeller?	Getaran sedikit meningkat seiring waktu berlayar.
7.	Berapa nilai clearance (celah) pada bearing saat pembongkaran dilakukan?	Nilai clearance sudah melebihi batas toleransi.
8.	Setelah dibongkar, bagaimana kondisi fisik bibir seal? Apakah terdapat	Didapat pengerasan material.

	goresan, pengerasan material, atau sobekan?	
9.	Saat pembongkaran, apakah ditemukan endapan lumpur atau pasir di dalam rumah <i>seal</i> ?	Terdapat endapan lumpur disekitar area <i>seal</i> yang dimana lumpur tersebut menjadi salah satu penyebab kerusakan <i>seal</i> .
10.	Apakah sebelumnya kapal berlayar di perairan dangkal?	Kapal sebelumnya berlayar di perairan dangkal.
11.	Apakah terdapat jadwal pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter (<i>strainer</i>) pada jalur suplai sistem <i>flushing</i> /pengairan menuju <i>stern tube</i> , dan apakah jadwal tersebut dijalankan secara konsisten?	Tidak ada jadwal untuk pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter pada jalur suplai.

Bukti wawancara:



Bukti link video :

<https://drive.google.com/file/d/1uQpu4UkUhIm9R1PYuYC8Edf3eLnJ52gg/view?usp=sharing>

D. Quality Control

No	Pertanyaan	Jawaban
1.	Berdasarkan inspeksi, kerusakan apa yang terlihat pada <i>seal</i> ? <ul style="list-style-type: none"> - Aus tidak merata - Kerusakan o-ring - Overheating 	Kerusakan o-ring dan <i>seal</i> mengalami pegerasan.
2.	Apakah ditemukan indikasi misalignment antara shaft propeller dan housing <i>seal</i> ?	Tidak ada indikasi terjadinya misalignment yang terjadi.

3.	Apa faktor teknis yang paling berpengaruh terhadap kerusakan seal tersebut?	Perawatan yang kurang terhadap sistem pelumasan shaft propeller.
4.	Bagaimana prosedur pemasangan seal yang diterapkan?	Tahap pemasangan dimulai dari pembersihan, pemasangan housing seal, pemasangan seal ring.
5.	Apakah temperatur atau tekanan pada sistem seal pernah melebihi kondisi normal?	Tidak ada jadwal khusus pengecekan kondisi sistem.
6.	Apakah pernah terjadi getaran berlebih pada shaft propeller?	Getaran sedikit meningkat seiring waktu berlayar.
7.	Berapa nilai clearance (celah) pada bearing saat pembongkaran dilakukan?	Clearance melebihi batas toleransi.
8.	Setelah dibongkar, bagaimana kondisi fisik bibir seal? Apakah terdapat goresan, pengerasan material, atau sobekan?	Pengerasan material dan material mengalami keausan.
9.	Saat pembongkaran, apakah ditemukan endapan lumpur atau pasir di dalam rumah seal?	Adanya endapan lumpur disekitar area seal yang dimana lumpur tersebut menjadi salah satu penyebab kerusakan seal.
10.	Apakah sebelumnya kapal berlayar diperairan dangkal?	Kapal sebelumnya berlayar di perairan dangkal
11.	Apakah terdapat jadwal pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter (<i>strainer</i>) pada jalur suplai sistem <i>flushing</i> /pengairan menuju <i>stern tube</i> , dan apakah jadwal tersebut dijalankan secara konsisten?	Tidak ada jadwal untuk pengecekan dan pembersihan rutin terhadap filter pada jalur suplai.

Bukti wawancara :



Link video :

https://drive.google.com/file/d/1Tz86zhMqGPUOSAkqwNxaMJox7BfzMLaV/view?usp=drive_link