

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Tugboat



Gambar 2. 1 Tugboat

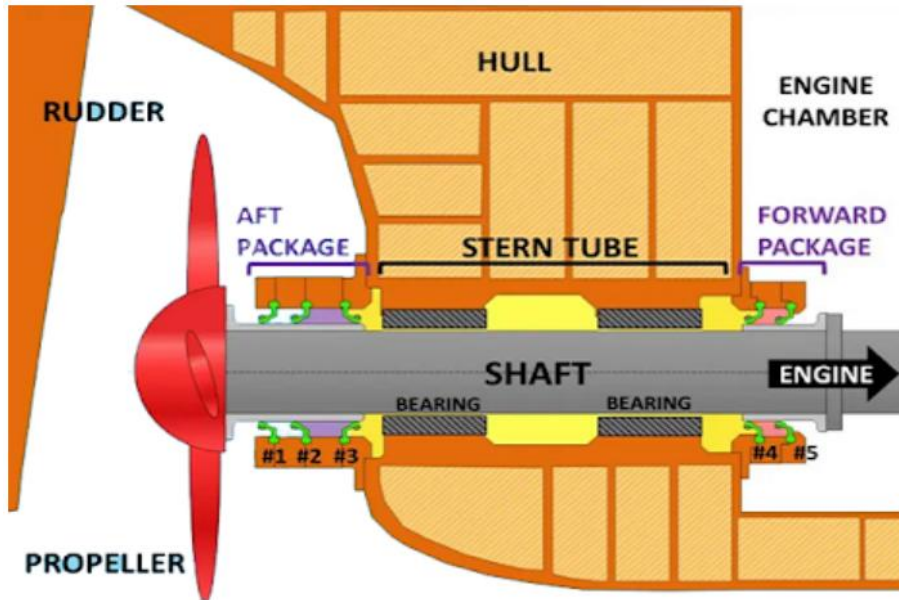
(Sumber : <https://www.chinarubberfender.com/main-types-of-tugboats-at-sea-you-should-know/>)

Kapal tunda (*tugboat*) merupakan kapal kerja yang berukuran relatif kecil namun memiliki daya mesin serta kemampuan manuver yang sangat tinggi. Kapal ini dirancang secara khusus untuk mendorong, menarik, atau memandu kapal lain yang berukuran lebih besar, terutama pada kondisi operasi terbatas seperti di pelabuhan, alur pelayaran sempit, dan perairan dangkal. Tugboat umumnya digunakan ketika kapal besar tidak mampu bermanuver secara optimal dengan tenaga mesin dan sistem kemudinya sendiri, khususnya pada kecepatan rendah dan dalam ruang gerak yang terbatas (Carral Couce et al., 2015). Salah satu karakteristik utama kapal tugboat adalah tingginya bollard pull yaitu gaya tarik maksimum yang dapat dihasilkan kapal dalam kondisi diam. Parameter ini menjadi indikator utama dalam menentukan kemampuan tugboat untuk menangani, mengendalikan, dan membantu manuver kapal lain selama operasi sandar, lepas sandar, maupun pengawalan (Pérez-Canosa et al., 2022).

Daya mesin tugboat bervariasi tergantung pada jenis dan area operasinya, namun secara umum berada pada kisaran 500–2500 kW, dengan beberapa tugboat modern bahkan memiliki daya yang lebih besar untuk kebutuhan escort tug dan operasi khusus di pelabuhan besar (Viran et al., 2021). Kombinasi antara daya mesin yang tinggi, sistem propulsi khusus, dan desain lambung yang mendukung menjadikan tugboat

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>)

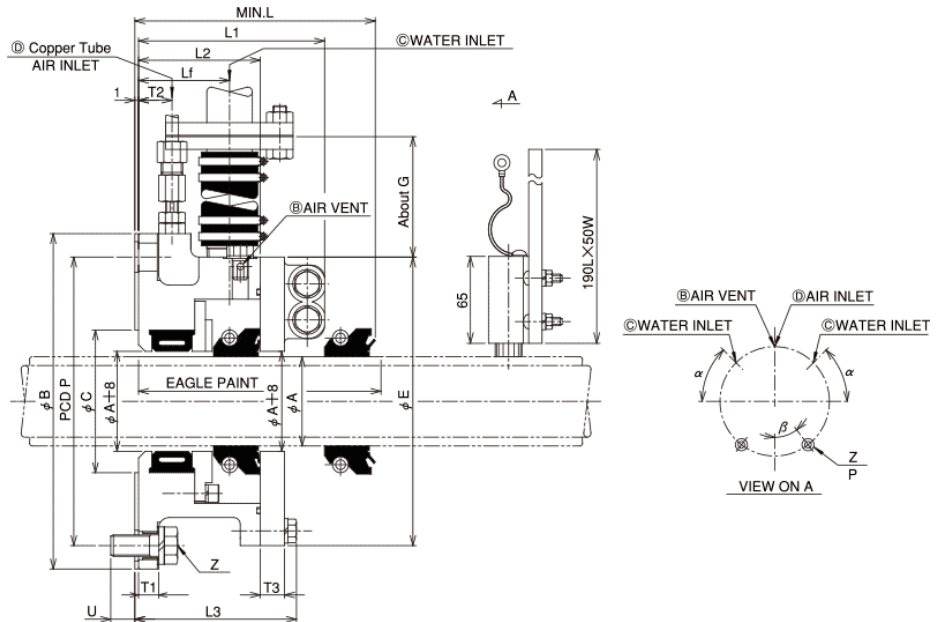
Sistem pelumasan poros baling-baling merupakan sistem propulsi kapal yang berfungsi utama untuk mengendalikan gesekan mekanis dan menjaga stabilitas putaran poros di dalam bantalan *stern tube* (Litwin, 2009). Dalam operasionalnya khususnya pada jenis kapal tunda poros baling-baling dituntut untuk menopang 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

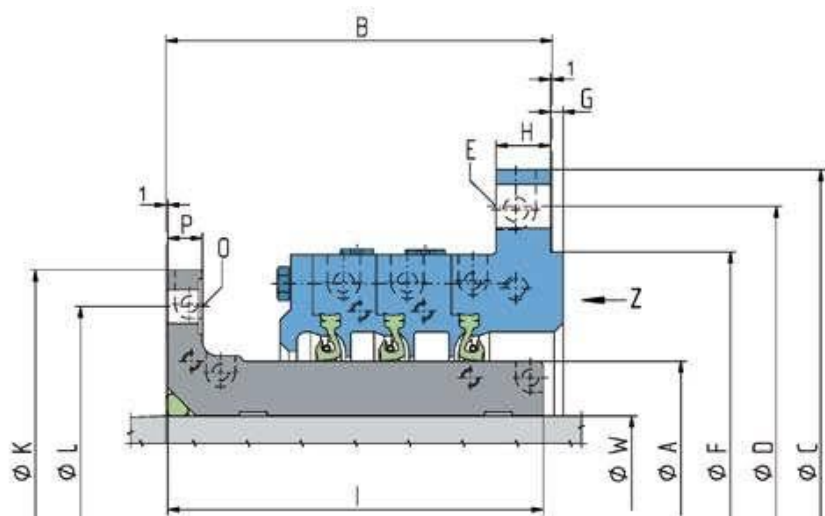
(Sumber :

<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

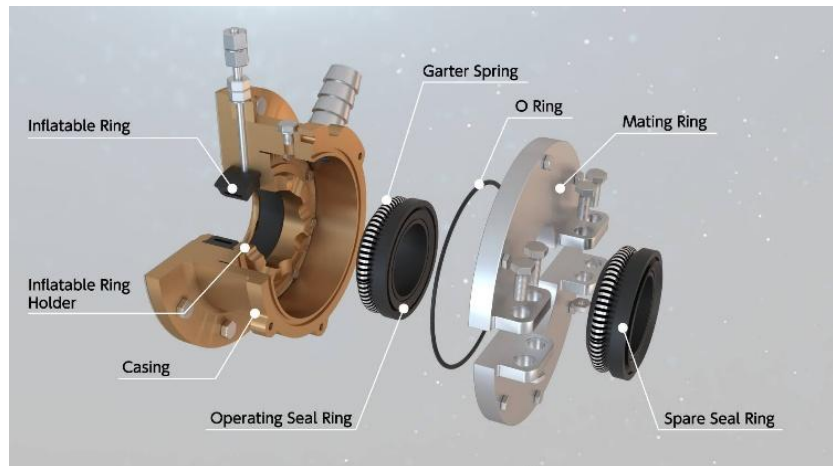
(Sumber : [https://ros.no/ws/media-](https://ros.no/ws/media-library/fd21059a12fc4355ba2a33656d117a57/simplexshaftcomponentscatalogue.pdf)

[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.