

Analisis Dan Perbaikan Kerusakan *Propeller* Pada Kapal Batulayar Untuk Meningkatkan Kinerja *Propulsi*

Santhi Wilastari¹, Titik Istirokhatun²

^{1*}Universitas Diponegoro, Indonesia

²Universitas Diponegoro, Indonesia

Alamat: Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Korespondensi penulis: swilastari@gmail.com

Abstract. This study aims to analyze and implement corrective measures for the damage in ship propeller performance caused by unbalance, fouling, and erosion. Propeller damage is known to reduce propulsion system efficiency and generate vibrations that negatively affect the operational performance and safety of the vessel. The corrective methods applied include cleaning fouling from the propeller surface, repairing cavitation and erosion damage through welding using similar material (brass), and performing a balancing process to restore the propeller's dynamic equilibrium. After the repair process, the propeller is transferred to the balancing area for inspection and verification by a classification surveyor to ensure its operational feasibility. The transfer process is supported by heavy equipment such as forklifts and cranes available at the floating dock. The results indicate that propeller imbalance can cause significant disturbances in the ship's propulsion system, particularly in the form of increased vibration. Propeller damage is generally caused by operational factors, such as collisions with floating objects in shallow waters, as well as wear due to prolonged mechanical interaction with seawater. In addition, delayed maintenance due to postponed docking schedules contributes to increased erosion, which ultimately leads to propeller unbalance.

Key words: propeller, balance, dock, fouling, erosion

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis serta melakukan upaya perbaikan terhadap kerusakan kerja *propeller* kapal yang disebabkan oleh kondisi *unbalance*, *fouling*, dan erosi. Kerusakan *propeller* diketahui dapat menurunkan kinerja sistem propulsi serta menimbulkan getaran yang berdampak pada efisiensi dan keselamatan operasional kapal. Metode penanganan yang dilakukan meliputi pembersihan *fouling* pada permukaan *propeller*, perbaikan kerusakan akibat kavitasi dan erosi melalui proses pengelasan menggunakan material sejenis (kuningan), serta proses *balancing* untuk mengembalikan keseimbangan dinamis *propeller*. Setelah dilakukan perbaikan, *propeller* dipindahkan ke area pengujian untuk dilakukan inspeksi oleh *surveyor class* guna memastikan kelayakan operasionalnya. Proses pemindahan didukung oleh penggunaan alat berat seperti forklift dan crane di dok apung. Hasil kajian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan *propeller* dapat menyebabkan gangguan signifikan pada sistem penggerak kapal, terutama berupa peningkatan getaran. Kerusakan *propeller* umumnya disebabkan oleh faktor operasional, seperti benturan dengan benda asing di perairan dangkal, serta faktor keausan akibat interaksi mekanis dengan air laut dalam jangka panjang. Selain itu, keterlambatan perawatan akibat penundaan jadwal docking turut memperparah tingkat erosi yang berdampak pada ketidakseimbangan *propeller*.

Kata kunci: propeller, balance, dock, fouling, erosi

1. LATAR BELAKANG

Propeller merupakan salah satu komponen utama sistem propulsi kapal karena berfungsi mengubah energi mekanik yang dihasilkan mesin induk menjadi gaya dorong hidrodinamis. Kondisi propeller mempunyai hubungan erat dengan kemampuan kapal dalam menghasilkan gaya dorong, kestabilan operasi, getaran, dan keandalan sistem propulsi. Kerusakan pada blade

dapat mengubah distribusi gaya dan tekanan selama propeller berputar sehingga berpotensi menimbulkan gangguan pada sistem propulsi.

Dalam kondisi operasi, propeller dapat mengalami berbagai bentuk kerusakan, antara lain fouling, erosi akibat kavitasi, retakan, deformasi, dan kerusakan akibat benturan dengan benda asing. Kavitasi menjadi salah satu fenomena yang perlu diperhatikan karena pembentukan dan keruntuhan gelembung pada permukaan blade dapat menyebabkan kerusakan material secara bertahap. Penelitian mengenai erosi kavitasi pada propeller menunjukkan bahwa fenomena tersebut dapat menyebabkan kehilangan material pada permukaan blade dan berpengaruh terhadap umur operasi serta performa propeller (Köksal et al., 2021; Melissaris et al., 2022).

Selain kavitasi, kondisi permukaan propeller juga berpengaruh terhadap karakteristik operasi. Fouling yang menempel pada permukaan propeller dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan memengaruhi kondisi aliran di sekitar blade. Oleh karena itu, pemeriksaan dan pembersihan propeller merupakan bagian penting dalam kegiatan pemeliharaan kapal. Kajian mengenai pelapisan propeller juga menunjukkan bahwa pengendalian fouling dan kerusakan akibat kavitasi menjadi bagian penting dalam mempertahankan kondisi propeller (Zhang et al., 2023).

Ketidakseimbangan propeller juga perlu mendapat perhatian karena dapat menghasilkan gaya eksitasi yang memengaruhi sistem poros dan struktur kapal. Penelitian mengenai sistem poros propulsi menunjukkan bahwa kondisi sistem poros, getaran, dan alignment memiliki hubungan dengan keandalan dan respons temperatur bearing (Lei et al., 2021). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa gaya eksitasi propeller dapat berkaitan dengan getaran sistem propulsi (Jiang et al., 2021).

Penelitian mengenai perbaikan propeller juga menunjukkan pentingnya proses pengelasan yang sesuai dengan kondisi kerusakan dan material propeller. Dwisetiono dan Dikrullo (2022), misalnya, mengkaji pengaruh posisi pengelasan dan diameter filler terhadap hasil pengelasan pada daun propeller. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses perbaikan tidak hanya berkaitan dengan pembentukan kembali geometri blade, tetapi juga perlu memperhatikan kualitas material hasil perbaikan.

Penelitian terdahulu telah banyak membahas kavitasi, erosi, getaran, dan material propeller melalui pengujian laboratorium maupun simulasi numerik. Namun, kajian berbasis kondisi aktual propeller kapal yang mengintegrasikan identifikasi kerusakan dengan tahapan perbaikan di galangan masih penting dilakukan, khususnya sebagai dokumentasi praktik pemeliharaan propeller pada kapal yang menjalani docking. Penelitian ini mengambil kasus

pada Kapal Batulayar dan memusatkan perhatian pada identifikasi kerusakan propeller serta tahapan pemeriksaan dan perbaikannya.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah: (1) mengidentifikasi jenis kerusakan yang ditemukan pada propeller Kapal Batulayar; (2) mengidentifikasi faktor yang berpotensi menyebabkan kerusakan; dan (3) mendeskripsikan tahapan pemeriksaan dan perbaikan propeller yang dilakukan selama proses docking. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran praktis mengenai pentingnya pemeliharaan propeller dalam mendukung keandalan sistem propulsi kapal.

2. KAJIAN TEORITIS

Propeller dan Sistem Propulsi Kapal

Propeller merupakan komponen utama pada sistem propulsi kapal yang berfungsi menghasilkan gaya dorong untuk menggerakkan kapal. Energi mekanik yang dihasilkan oleh mesin induk diteruskan melalui poros propeller dan selanjutnya diubah menjadi gaya dorong melalui interaksi antara blade propeller dan air. Oleh karena itu, kondisi propeller memiliki peranan penting terhadap kemampuan kapal dalam menghasilkan thrust, torque, efisiensi propulsi, dan kestabilan operasi.

Kajian mengenai propeller menunjukkan bahwa kinerja propeller dipengaruhi oleh berbagai aspek, antara lain bentuk geometris blade, kondisi aliran, material, kavitasi, getaran, dan kondisi operasional. Majumder dan Maity (2022) menjelaskan bahwa penelitian propeller modern mencakup aspek efisiensi, thrust, torque, kavitasi, getaran, pemilihan material, analisis struktur, serta berbagai metode optimasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi fisik propeller merupakan salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam mempertahankan kinerja sistem propulsi. Pada kapal dengan Fixed Pitch Propeller (FPP), sudut pitch propeller pada dasarnya tetap selama operasi. Dengan demikian, perubahan geometri akibat kerusakan, seperti bending, erosi atau kerusakan pada ujung blade, dapat menyebabkan perubahan karakteristik hidrodinamis propeller. Kondisi tersebut dapat memengaruhi distribusi gaya pada blade dan selanjutnya memengaruhi kestabilan sistem propulsi.

Kerusakan pada Propeller

Propeller bekerja pada lingkungan yang relatif berat karena berinteraksi secara terus-menerus dengan air laut pada kecepatan putar tertentu. Lingkungan tersebut menyebabkan propeller dapat mengalami berbagai bentuk kerusakan, antara lain fouling, erosi akibat kavitasi, korosi, retakan, deformasi, serta kerusakan akibat benturan dengan benda asing. Dwisetiono

dan Dikrulloh (2022) menyebutkan bahwa kerusakan yang umum ditemukan pada daun propeller antara lain fouling, erosi akibat kavitasi, retakan, dan bending akibat benturan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa proses perbaikan melalui pengelasan perlu memperhatikan posisi pengelasan dan diameter filler karena kedua parameter tersebut dapat memengaruhi karakteristik hasil pengelasan pada daun propeller.

Kerusakan propeller dapat dikelompokkan menjadi kerusakan akibat faktor mekanis, hidrodinamis, lingkungan, dan pemeliharaan. Kerusakan mekanis dapat berupa benturan dan deformasi, sedangkan kerusakan hidrodinamis salah satunya berkaitan dengan kavitasi. Faktor lingkungan meliputi air laut, korosi, dan pertumbuhan organisme laut. Adapun faktor pemeliharaan dapat berupa keterlambatan inspeksi dan perawatan sehingga kerusakan yang pada awalnya relatif kecil berkembang menjadi lebih serius.

Fouling pada Propeller

Fouling merupakan pertumbuhan atau penempelan organisme laut pada permukaan komponen kapal yang berada di dalam air, termasuk permukaan propeller. Keberadaan fouling dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan mengubah kondisi aliran di sekitar blade.

Pada propeller, permukaan yang tertutup organisme laut dapat mengganggu kondisi aliran dan memengaruhi kemampuan blade dalam menghasilkan gaya dorong. Selain itu, fouling dapat menyulitkan proses pemeriksaan karena kerusakan seperti retakan dan erosi dapat tertutup oleh lapisan organisme yang menempel. Zhang et al. (2023) menjelaskan bahwa propeller menghadapi permasalahan fouling dan erosi akibat kavitasi secara bersamaan sehingga pengembangan perlindungan permukaan propeller menjadi salah satu bidang penelitian penting. Kajian tersebut menempatkan fouling dan kavitasi sebagai dua faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menjaga performa dan umur pakai propeller.

Berdasarkan kajian tersebut, pembersihan fouling merupakan tahapan awal yang penting dalam pemeliharaan propeller. Pembersihan tidak hanya bertujuan mengembalikan kondisi permukaan, tetapi juga memungkinkan pemeriksaan terhadap kondisi material blade dilakukan dengan lebih akurat.

Kavitasi dan Erosi Propeller

Kavitasi merupakan fenomena terbentuknya rongga atau gelembung uap akibat kondisi tekanan lokal yang mengalami penurunan hingga mendekati atau berada di bawah tekanan uap cairan. Pada propeller, kavitasi dapat terjadi pada daerah blade yang mengalami kondisi tekanan rendah ketika propeller berputar. Kavitasi menjadi salah satu permasalahan penting

dalam sistem propulsi kapal karena dapat menimbulkan beberapa dampak, antara lain penurunan thrust, getaran, kebisingan, dan erosi permukaan blade. Van Terwisga et al. (2021) menjelaskan bahwa kavitasi pada propeller kapal dapat berkaitan dengan thrust breakdown, getaran, kebisingan, serta kavitasi erosi.

Kavitasi yang terjadi secara berulang dapat menyebabkan kerusakan material pada permukaan blade. Ketika gelembung kavitasi mengalami keruntuhan di dekat permukaan material, terjadi beban lokal yang berulang sehingga material dapat mengalami pengikisan. Köksal et al. (2021) mengkaji prediksi erosi akibat kavitasi pada propeller dan menunjukkan pentingnya hubungan antara kondisi wake, kavitasi, dan lokasi terjadinya erosi. Penilaian terhadap risiko erosi juga penting dilakukan pada kondisi propeller aktual. Melissaris et al. menunjukkan bahwa penilaian risiko erosi kavitasi dapat diterapkan pada propeller skala penuh sehingga kondisi operasi aktual perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kerusakan propeller. Dari sisi material, ketahanan terhadap erosi kavitasi juga menjadi faktor penting. Usta et al. (2023) melakukan kajian sistematis terhadap pengujian erosi kavitasi pada material propeller dan menunjukkan pentingnya karakteristik material dalam mengevaluasi ketahanan terhadap kerusakan akibat kavitasi. Dengan demikian, erosi yang ditemukan pada daun propeller dalam penelitian ini dapat dipahami sebagai salah satu bentuk kerusakan yang perlu dikaji dalam kaitannya dengan kondisi kavitasi selama operasi kapal.

Perbaikan Propeller

Perbaikan propeller dilakukan berdasarkan jenis dan tingkat kerusakan. Secara umum, tahapan perbaikan dapat meliputi pembersihan, pemeriksaan kondisi permukaan, penghilangan material yang rusak, penambahan material melalui pengelasan, penggerindaan, pemeriksaan NDT, pengukuran geometri, balancing, dan pemeriksaan akhir. Pengelasan merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengembalikan material pada bagian blade yang mengalami erosi atau kerusakan. Namun, proses pengelasan harus memperhatikan kesesuaian material, prosedur pengelasan, serta kondisi hasil las. Dwisetiono dan Dikrulloh (2022) melakukan penelitian mengenai pengelasan daun propeller menggunakan metode Gas Metal Arc Welding (GMAW) dan mengevaluasi pengaruh posisi pengelasan serta diameter filler terhadap karakteristik hasil pengelasan melalui pengujian tarik, kekerasan, dampak, dan pengamatan makrografi. Hasil penelitian tersebut memperkuat pentingnya pengendalian parameter pengelasan dalam pekerjaan perbaikan propeller.

3. METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dengan metode studi kasus. Pendekatan tersebut digunakan karena penelitian berfokus pada pengamatan secara langsung terhadap kondisi propeller Kapal Batulayar dan dokumentasi tahapan pemeriksaan serta perbaikan yang dilakukan selama proses pengedokan.

Penelitian tidak dimaksudkan untuk mengukur peningkatan efisiensi propulsi secara kuantitatif, tetapi untuk mengidentifikasi kondisi kerusakan dan mendeskripsikan tindakan perbaikan yang dilakukan terhadap propeller. Oleh karena itu, interpretasi hasil difokuskan pada kondisi fisik propeller, jenis kerusakan, penyebab yang teridentifikasi atau diduga berdasarkan kondisi lapangan, serta tahapan perbaikannya.

Lokasi dan Objek Penelitian

Pengambilan data dilakukan pada propeller Kapal Batulayar yang sedang menjalani proses pengedokan di Galangan Kapal PT Janata Marina Indah, Semarang.

Propeller yang diamati merupakan jenis Fixed Pitch Propeller (FPP). Spesifikasi propeller berdasarkan data penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Propeller Kapal Batulayar

No.	Parameter	Spesifikasi
1	Jenis propeller	Fixed Pitch Propeller (FPP)
2	Diameter	2,5 m
3	Pitch	2,0–3,0 m
4	Jumlah bilah	4 buah
5	Material	Kuningan

Fixed Pitch Propeller merupakan propeller dengan pitch tetap selama operasi. Kondisi geometrinya menyebabkan perubahan bentuk blade akibat kerusakan dapat memengaruhi karakteristik kerja propeller sehingga pemeriksaan geometri menjadi bagian penting dalam proses perawatan.

Teknik Pengumpulan Data

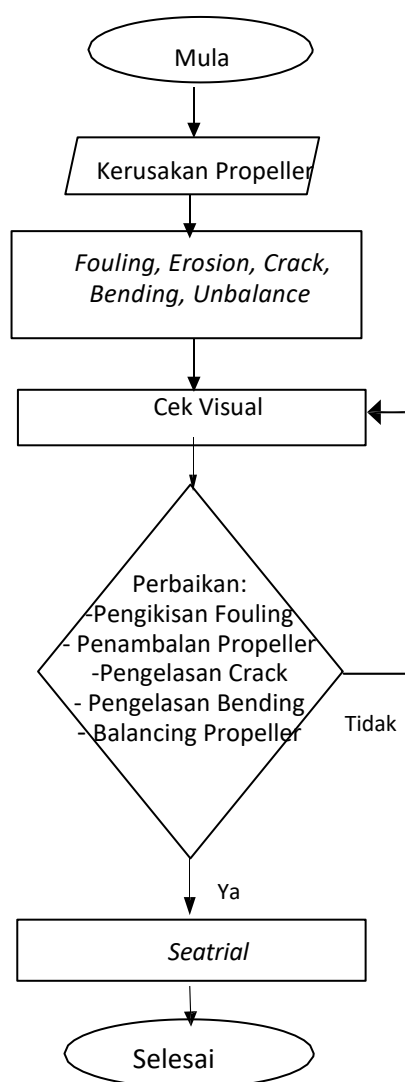
Data penelitian diperoleh melalui observasi langsung, dokumentasi visual, dan pencatatan tahapan pekerjaan selama proses perbaikan propeller. Observasi dilakukan terhadap

kondisi permukaan blade, fouling, erosi, retakan, deformasi, serta kondisi keseimbangan propeller.

Dokumentasi berupa gambar digunakan untuk memperlihatkan kondisi aktual propeller sebelum, selama, dan setelah proses perbaikan. Data mengenai tahapan pekerjaan juga digunakan untuk menyusun alur pemeriksaan dan perbaikan propeller.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi identifikasi objek, pemeriksaan kondisi propeller, identifikasi jenis kerusakan, analisis penyebab kerusakan berdasarkan hasil pengamatan, pelaksanaan perbaikan, pemeriksaan hasil perbaikan, balancing, pemeriksaan oleh pihak klasifikasi, pemasangan kembali, dan sea trial.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Alur tersebut digunakan untuk memastikan bahwa proses perbaikan dilakukan secara sistematis mulai dari identifikasi kerusakan hingga pemeriksaan akhir.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi dan Jenis Kerusakan Propeller

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa propeller Kapal Batulayar mengalami beberapa kondisi kerusakan, yaitu fouling, erosi, retakan, deformasi atau bending, dan ketidakseimbangan. Kerusakan tersebut tidak selalu disebabkan oleh satu faktor, tetapi dapat merupakan hasil interaksi antara kondisi operasional, lingkungan, material, dan pemeliharaan.

a. Benturan pada Daun Propeller

Benturan dengan benda keras di dalam air merupakan salah satu penyebab kerusakan mekanis pada propeller. Benda asing dapat berupa kayu, material terapung, batu, atau objek lain yang berada pada lintasan propeller, terutama ketika kapal beroperasi di perairan dangkal.

Pada objek penelitian ditemukan indikasi deformasi pada bagian ujung blade. Deformasi tersebut dapat menyebabkan perubahan bentuk blade dan ketidaksesuaian geometri antarbilah. Apabila kondisi tersebut tidak diperbaiki, distribusi gaya dorong selama putaran propeller dapat menjadi tidak seragam.

b. Fouling

Fouling ditemukan berupa organisme laut yang menempel pada permukaan blade, terutama pada bagian depan blade.



Gambar 2. Fouling yang Menempel pada Propeller

Fouling menyebabkan permukaan propeller menjadi lebih kasar dan dapat mengganggu kondisi aliran di sekitar blade. Oleh karena itu, pembersihan propeller merupakan langkah awal yang penting sebelum dilakukan pemeriksaan lebih lanjut. Selain mengembalikan kondisi permukaan, pembersihan juga diperlukan agar kerusakan seperti retakan dan erosi yang sebelumnya tertutup fouling dapat terlihat.

Kajian mengenai perlindungan propeller menunjukkan bahwa fouling dan kavitasi merupakan dua permasalahan yang perlu diperhatikan dalam mempertahankan kondisi permukaan propeller (Zhang et al., 2023).

Erosi pada Daun Propeller

Erosi ditemukan pada permukaan blade dan diduga berkaitan dengan aktivitas kavitasi selama operasi. Kavitasi terjadi ketika kondisi tekanan lokal di sekitar blade memungkinkan terbentuknya rongga atau gelembung uap yang kemudian mengalami keruntuhan. Proses tersebut dapat menghasilkan beban lokal berulang pada permukaan material.

Penelitian Köksal et al. (2021) menunjukkan bahwa kondisi aliran dan kavitasi pada propeller mempunyai hubungan dengan distribusi intensitas erosi. Sementara itu, Melissaris et al. (2022) menunjukkan bahwa penilaian risiko erosi kavitasi dapat dilakukan pada propeller skala penuh dan penting untuk mempertimbangkan kondisi operasi aktual.



Gambar 3. Erosi pada Daun Propeller

Erosi yang dibiarkan berkembang dapat mengurangi ketebalan material blade dan mengubah profil permukaan. Oleh sebab itu, kerusakan akibat erosi perlu diperiksa dan diperbaiki sebelum propeller digunakan kembali.

Keretakan pada Daun Propeller

Retakan ditemukan pada beberapa bagian blade. Retakan dapat berkaitan dengan beban berulang, benturan, konsentrasi tegangan, maupun perkembangan kerusakan sebelumnya.



Gambar 4. Keretakan pada Daun Propeller

Pemeriksaan retakan diperlukan karena kerusakan permukaan yang kecil dapat berkembang apabila propeller terus beroperasi dalam kondisi pembebanan berulang.

Pemeriksaan menggunakan metode non-destructive test (NDT) dilakukan untuk membantu memastikan tidak terdapat indikasi retakan setelah proses perbaikan.

Deformasi atau Bending

Deformasi ditemukan pada bagian ujung blade.



Gambar 5. Patah dan Bending pada Daun Propeller

Bending menyebabkan perubahan bentuk blade dan berpotensi mengubah distribusi gaya hidrodinamis. Perubahan geometri tersebut perlu dikembalikan sedekat mungkin dengan kondisi desain atau data pengukuran sebelumnya.

Faktor Penyebab Kerusakan

Berdasarkan hasil pengamatan, faktor penyebab kerusakan dapat dikelompokkan menjadi faktor operasional, faktor lingkungan, dan faktor pemeliharaan. Faktor operasional terutama berupa kemungkinan benturan dengan benda asing. Faktor lingkungan berkaitan dengan interaksi terus-menerus antara propeller dan air laut, termasuk fouling dan kondisi kavitasi. Sementara itu, faktor pemeliharaan berkaitan dengan keterlambatan pelaksanaan docking atau perawatan yang memungkinkan kerusakan berkembang lebih lanjut.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa kavitasi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada material propeller. Penelitian Usta et al. (2023) menunjukkan bahwa ketahanan material propeller terhadap erosi kavitasi dapat berbeda bergantung pada komposisi material, sehingga karakteristik material menjadi salah satu aspek penting dalam evaluasi kerusakan.

Dampak Kerusakan terhadap Sistem Propulsi

Kerusakan pada propeller dapat memberikan dampak terhadap sistem propulsi. Fouling dapat memengaruhi kondisi permukaan dan aliran di sekitar blade, sedangkan erosi dan deformasi dapat mengubah geometri blade. Retakan dapat mengurangi integritas material, sementara ketidakseimbangan dapat menghasilkan gaya eksitasi selama propeller berputar. Hubungan antara propeller dan getaran sistem propulsi menjadi perhatian penting dalam pemeliharaan kapal. Penelitian Jiang et al. (2021) menunjukkan bahwa gaya yang ditimbulkan propeller dapat menjadi sumber eksitasi pada struktur buritan. Penelitian Lei et al. (2021) juga

menunjukkan bahwa karakteristik getaran sistem poros propulsi berkaitan dengan kondisi alignment dan respons komponen pendukung seperti bearing.

Dengan demikian, balancing setelah perbaikan tidak hanya merupakan tahap untuk menyelesaikan pekerjaan pada propeller, tetapi juga menjadi bagian penting untuk memastikan kondisi putaran propeller sebelum digunakan kembali.

PROSES PERBAIKAN PROPELLER

Pembersihan Propeller

Pembersihan dilakukan untuk menghilangkan fouling atau organisme laut yang menempel pada permukaan blade. Proses dilakukan menggunakan alat sekrap dan dilanjutkan dengan penyemprotan menggunakan water jet. Pembersihan dilakukan sebelum pemeriksaan detail sehingga kerusakan yang sebelumnya tertutup dapat diidentifikasi.

Pelepasan Propeller

Setelah pemeriksaan awal, propeller dilepaskan dari poros secara hati-hati. Sebelum pelepasan dilakukan, propeller diikat menggunakan wire sling yang dihubungkan dengan crane dan chain block. Penggunaan peralatan tersebut diperlukan untuk menjaga posisi dan kestabilan propeller selama proses pelepasan. Setelah terlepas dari tail shaft, propeller diangkat menggunakan crane dan dipindahkan menuju area bengkel untuk proses pemeriksaan dan perbaikan.

Perbaikan Fouling

Perbaikan fouling dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu: membersihkan organisme laut menggunakan alat sekrap, melakukan penggerindaan pada permukaan blade, melakukan pemeriksaan visual terhadap kondisi permukaan, melakukan pemeriksaan menggunakan metode colour cracking untuk mendeteksi indikasi retakan. Pembersihan sebelum inspeksi merupakan tahapan penting karena keberadaan fouling dapat menghambat identifikasi kerusakan pada permukaan blade.

Perbaikan Erosi

Perbaikan erosi dilakukan dengan membersihkan bagian yang mengalami kerusakan menggunakan mesin gerinda dan cup brush. Setelah permukaan bersih, bagian yang mengalami kehilangan material ditambahkan kembali melalui proses pengelasan dengan material yang sesuai.

Setelah pengelasan selesai, permukaan diratakan menggunakan gerinda hingga mendekati bentuk dan ketebalan semula. Pemeriksaan kemudian dilakukan menggunakan colour cracking test, dilanjutkan dengan pengukuran dan balancing.

Penggunaan proses pengelasan untuk perbaikan daun propeller perlu memperhatikan posisi pengelasan, material pengisi, dan kualitas hasil pengelasan. Hal ini didukung oleh penelitian Dwisetiono dan Dikrulloh (2022) yang menunjukkan bahwa parameter pengelasan dapat memengaruhi karakteristik hasil perbaikan daun propeller.

Perbaikan Retakan

Perbaikan retakan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: menempatkan propeller pada area kerja, melakukan pengeboran pada kedua ujung retakan untuk membatasi perambatan, menggerinda daerah retakan sebagai persiapan pengelasan, melakukan pengelasan menggunakan material yang sesuai, melakukan pendinginan secara alami, meratakan permukaan hasil las dengan gerinda, melakukan colour cracking test, mengukur ketebalan blade, melakukan balancing setelah perbaikan selesai. Pemeriksaan setelah pengelasan diperlukan untuk memastikan tidak terdapat cacat permukaan atau retakan lanjutan.

Perbaikan Deformasi atau Bending

Perbaikan bending dilakukan dengan menghilangkan bagian yang rusak apabila diperlukan dan membentuk kembali profil blade melalui proses pengelasan. Setelah pembentukan, permukaan diratakan dengan penggerindaan. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan retakan, pengukuran geometri, dan pemeriksaan oleh pihak klasifikasi. Tahap akhir dilakukan melalui balancing untuk memastikan propeller berada dalam kondisi yang sesuai sebelum dipasang kembali.

Pengukuran Propeller

Pengukuran dilakukan untuk memastikan dimensi blade setelah perbaikan mendekati data sebelumnya. Pengukuran menjadi penting karena proses pengelasan dan penggerindaan dapat mengubah bentuk serta ketebalan blade. Data pengukuran dapat digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kesesuaian geometri antarbilah dan membantu memastikan bahwa perbaikan tidak menghasilkan perbedaan geometri yang berlebihan.

Balancing Propeller

Balancing dilakukan setelah proses perbaikan selesai. Tujuannya adalah memastikan distribusi massa propeller berada dalam kondisi seimbang.



Gambar 6. Proses Balancing Propeller

Ketidakseimbangan dapat menghasilkan gaya eksitasi selama putaran dan berpotensi meningkatkan getaran pada sistem propulsi. Oleh karena itu, balancing merupakan salah satu tahap penting sebelum propeller dipasang kembali. Penelitian mengenai sistem propulsi menunjukkan bahwa getaran pada sistem poros dapat berhubungan dengan kondisi operasi, alignment, dan interaksi komponen propulsi.

Non-Destructive Test

Pemeriksaan NDT dilakukan menggunakan metode dye penetrant test atau penetrant test.



Gambar 7. Proses NDT dengan Penetrant

Metode ini digunakan untuk membantu mengidentifikasi indikasi cacat permukaan atau retakan yang tidak mudah terlihat secara visual. Pemeriksaan dilakukan setelah proses perbaikan untuk memastikan kondisi permukaan propeller sebelum dinyatakan siap dipasang kembali.

Pemindahan dan Pemasangan Propeller

Propeller yang telah diperbaiki dipindahkan dari bengkel menuju kapal menggunakan peralatan angkat seperti overhead crane, railway crane, atau crane pada dok apung. Pemasangan dilakukan dengan menyelaraskan boss propeller dengan shaft. Permukaan tail shaft dan boss dibersihkan terlebih dahulu. Selanjutnya propeller dipasang secara perlahan menggunakan crane dan chain block hingga mencapai posisi yang sesuai. Setelah posisi propeller sesuai, mur pengunci dipasang dan dikencangkan. Pemeriksaan akhir dilakukan untuk memastikan propeller terpasang dengan baik.

Sea Trial

Sea trial merupakan tahap pengujian setelah kapal kembali ke air. Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem propulsi dapat bekerja dengan baik dalam kondisi operasi. Pemeriksaan selama sea trial meliputi kondisi mesin induk, generator, sistem poros, stern tube, dan propeller. Pada penelitian ini, sea trial diposisikan sebagai tahap verifikasi operasional setelah proses docking dan perbaikan.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kerusakan propeller Kapal Batulayar merupakan kombinasi dari beberapa bentuk kerusakan, yaitu fouling, erosi, retakan, bending, dan ketidakseimbangan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemeliharaan propeller tidak dapat hanya difokuskan pada satu jenis kerusakan.

Fouling perlu dibersihkan agar permukaan blade dapat diperiksa secara lebih akurat. Erosi perlu ditangani karena kehilangan material dapat mengubah bentuk dan ketebalan blade. Retakan memerlukan pemeriksaan NDT untuk memastikan kondisi material setelah perbaikan. Sementara itu, bending memerlukan pengembalian geometri blade agar kondisi antarbilah tetap sesuai. Dari perspektif hidrodinamika, kavitasi merupakan salah satu mekanisme penting yang perlu diperhatikan. Penelitian Köksal et al. (2021) memperlihatkan bahwa distribusi kavitasi dan kondisi wake dapat memengaruhi pola erosi pada propeller. Penelitian Melissaris et al. (2022) juga menunjukkan pentingnya penilaian erosi pada kondisi propeller skala penuh.

Dari perspektif material, penelitian Usta et al. (2023) menunjukkan bahwa komposisi material berbasis tembaga dapat memengaruhi ketahanan terhadap erosi kavitasi. Oleh karena itu, proses perbaikan menggunakan material yang sesuai menjadi bagian penting dalam mempertahankan integritas blade. Dari perspektif pemeliharaan, rangkaian pembersihan, inspeksi, pengelasan, penggerindaan, NDT, pengukuran, balancing, dan sea trial menunjukkan

bahwa perbaikan propeller harus dilakukan secara bertahap. Tahapan tersebut tidak hanya bertujuan mengembalikan bentuk fisik propeller, tetapi juga memastikan bahwa komponen dapat kembali digunakan dengan kondisi yang dapat diterima.

Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Penelitian belum melakukan pengukuran kuantitatif sebelum dan sesudah perbaikan terhadap thrust, daya poros, konsumsi bahan bakar, tingkat getaran, atau efisiensi propulsi. Oleh karena itu, peningkatan kinerja propulsi secara numerik belum dapat disimpulkan dari penelitian ini. Penelitian berikutnya dapat melengkapi pengamatan lapangan dengan pengukuran vibration level, shaft power, RPM, speed, fuel consumption, dan parameter propulsi lainnya sebelum dan sesudah perbaikan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, kerusakan pada propeller Kapal Batulayar meliputi fouling, erosi, retakan, deformasi atau bending, dan ketidakseimbangan. Kerusakan tersebut berkaitan dengan beberapa faktor, antara lain benturan dengan benda asing, interaksi jangka panjang dengan air laut, kavitasi, dan keterlambatan pemeliharaan.

Proses perbaikan dilakukan secara bertahap melalui pembersihan fouling, pelepasan propeller, pemeriksaan kerusakan, perbaikan erosi dan retakan melalui pengelasan, perbaikan deformasi, penggerindaan, pengukuran dimensi, pemeriksaan NDT, balancing, pemasangan kembali, serta sea trial. Tahapan tersebut menunjukkan bahwa pemeriksaan dan perbaikan propeller perlu dilakukan secara sistematis agar kondisi komponen dapat diverifikasi sebelum kapal kembali beroperasi.

Penelitian ini memberikan gambaran praktis mengenai proses penanganan kerusakan propeller pada kondisi aktual di galangan kapal. Meskipun demikian, penelitian belum menghasilkan data kuantitatif mengenai peningkatan efisiensi atau penurunan getaran setelah perbaikan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran sebelum dan sesudah perbaikan terhadap getaran, putaran propeller, daya poros, kecepatan kapal, konsumsi bahan bakar, serta parameter efisiensi propulsi sehingga pengaruh perbaikan terhadap kinerja sistem propulsi dapat dibuktikan secara kuantitatif.

DAFTAR REFERENSI

- Aktas, B., Usta, O., & Atlar, M. (2020). Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers. *Applied Ocean Research*, 94, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101868>

- Dwisetiono, D., & Dikrulloh, R. (2022). The effect of welding position and filler diameter on the results of welding propeller leaves with gas metal arc welding. *Zona Laut: Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, 3(1). <https://doi.org/10.62012/zl.v3i1.20068>
- Jiang, S., Huang, Z., Wu, D., Liu, Z., & Zhang, Z. (2021). Experimental investigation into vibration control of stern structure excited by propeller forces. *Chinese Journal of Ship Research*.
- Köksal, Ç. S., Usta, O., Aktas, B., Atlar, M., & Korkut, E. (2021). Numerical prediction of cavitation erosion to investigate the effect of wake on marine propellers. *Ocean Engineering*, 239, 109820. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109820>
- Lei, J., Zhou, R., Chen, H., Huang, G., Gao, Y., & Yang, Q. (2021). Effects of ship propulsion shafting alignment on whirling vibration and bearing temperature response. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 8353844. <https://doi.org/10.1155/2021/8353844>
- Melissaris, T., Schenke, S., Bulten, N., & van Terwisga, T. J. C. (2022). Cavitation erosion risk assessment on a full-scale steerable thruster. *Ocean Engineering*, 251, 111019. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111019>
- Usta, O., Köksal, Ç. S., & Korkut, E. (2023). A systematic study into the cavitation erosion test for marine propeller materials by cavitating jet technique. *Ocean Engineering*, 284, 115252. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115252>
- Zhang, J., Qin, W., Chen, W., Feng, Z., Wu, D., Liu, L., & Wang, Y. (2023). Integration of antifouling and anti-cavitation coatings on propellers: A review. *Coatings*, 13(9), 1619. <https://doi.org/10.3390/coatings13091619>
- Halilbeşe, A. N., Zhang, C., & Özsoysal, O. A. (2021). Effect of coupled torsional and transverse vibrations of the marine propulsion shaft system. *Journal of Marine Science and Application*, 20, 201–212.
- Kwon, J. et al. (2024). Experimental analysis of blade root cavitation erosion on set of model propellers. *Ocean Engineering*.