

Analisis *Fatigue Failure* pada *Shaft Propeller* sebagai Instrumen Utama Penggerak Kapal - Review

Irhami Al Adaby^{1)*}, Lintang Larasati Adi Putri²⁾, Sarmilah³⁾, Syafrie Muliarastu Dhiaulhaq⁴⁾,
Yasmina Amalia⁵⁾

Fakultas Teknologi Mineral, Jurusan Teknik Pertambangan, Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

Naskah diterima 31 05 2022; direvisi 15 05 2023; disetujui 15 05 2023

doi: <https://doi.org/10.24843/JEM.2022.v15.i01.p07>

Abstrak

Kegagalan struktur kapal laut menunjukkan bahwa persentase kegagalan yang signifikan disebabkan oleh desain yang tidak memadai karena kurangnya pertimbangan operasional, evaluasi elemen struktur yang tidak lengkap, dan metode perhitungan yang salah. Maka dari itu dilakukan analisa kelelahan pada *shaft* guna meminimalisir kecelakaan mengingat *shaft* bekerja sepanjang berjalannya kapal. Bahan yang digunakan dalam analisa adalah baja tahan karat austenitik atau baja kromium-nikel dengan kandungan nikel diatas 8%. Pengamatan dilaksanakan melalui metode pendekatan kepustakaan terhadap berbagai literatur terkait Analisis *Fatigue Failure* pada *Shaft Propeller* sebagai Instrumen Utama Penggerak Kapal. Getaran aksial dari sistem propulsi dapat menyebabkan getaran paksa. Kerusakan akibat getaran torsional dan aksial paling sering menyebabkan gurat, deformasi, dan patah. Hal terburuk yang akan terjadi dalam proses kegagalan *shaft* adalah *fracture* akibat pembebanan secara kontinyu dan diikuti dengan kemunculan crack pada permukaan shaft dan akhirnya shaft tidak dapat menahan tegangan yang dialami hingga mengalami *fracture* menjadi dua bagian atau lebih. Korosi pada stainless steel khususnya pada instrumen penggerak kapal juga memungkinkan untuk terjadi *stress corrosion cracking*. Untuk mengurangi efek korosi pada *fatigue failure* pada sebuah *shaft*, maka dapat dilakukan perlindungan katodik atau *coating* sebagai usaha memperlambat laju korosi yang terjadi.

Kata kunci: *fatigue*, kapal, *propeller*, *shaft*

Abstract

Ship structure failures indicate that a significant percentage of failures are caused by inadequate design due to lack of operational considerations, incomplete evaluation of structural elements, and incorrect calculation methods. Therefore, fatigue analysis was carried out on the shaft in order to minimize accidents considering that the shaft worked throughout the course of the ship. The materials used in the analysis are austenitic stainless steels or chromium-nickel steels with nickel content above 8%. Observations were carried out using a literature approach to various literatures related to Fatigue Failure Analysis on the Propeller Shaft as the Main Instrument for Propulsion of the Ship. Axial vibration of the propulsion system can cause forced vibration. Damage due to torsional and axial vibrations most commonly causes streaking, deformation, and fracture. The worst thing that will happen in the process of shaft failure is fracture due to continuous loading followed by the appearance of cracks on the shaft surface and finally the shaft cannot withstand the stress experienced until it fractures into two or more parts. Corrosion of stainless steel, especially on ship propulsion instruments, also allows for stress corrosion cracking. To reduce the effects of corrosion on fatigue failure of a shaft, cathodic protection or coating can be applied as an effort to slow down the corrosion rate that occurs.

Keywords: *fatigue*, *propeller*, *shaft*, *ship*

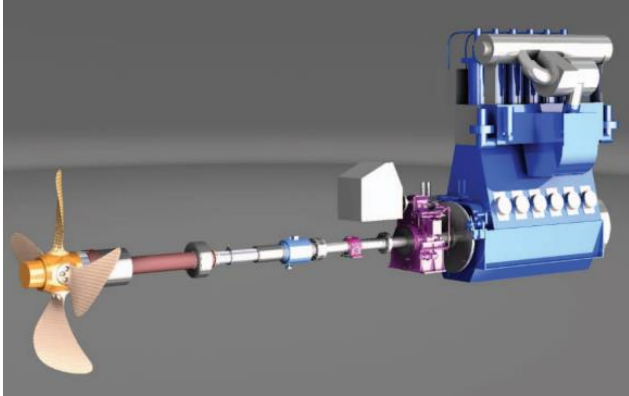
1. Pendahuluan

Industri pelayaran merupakan salah satu industri yang paling diatur dengan banyak standar komprehensif. Hal ini meliputi keselamatan, keamanan, kesehatan dan perlindungan awak kapal ketika di laut, juga dalam penjagaan lingkungan. Selain itu, kapal yang juga digunakan sebagai alat transportasi laut ini memiliki resiko kerusakan akibat berbagai hal saat beroperasi. Maka dari itu, terdapat inspeksi terhadap kapal, baik diumumkan terlebih dahulu maupun tidak, guna memastikan apakah kapal tersebut telah menerapkan standar keselamatan dan hukum internasional sesuai dengan yang telah ditentukan.

Untuk mengurangi terjadinya kecelakaan, kerusakan lingkungan dan kerugian ekonomi, maka probabilitas terjadinya *failure* pada kapal dapat diminimalisir. Selama pembuatan desain spesifik dari struktur suatu kapal harus dirancang, dibangun, dan dioperasikan dengan sedemikian rupa, sehingga suatu kapal dipilih struktur yang memiliki tingkat keamanan sesuai dengan ketentuan dan fungsi yang diperlukan. Seiring dengan berjalannya waktu, kekuatan suatu struktur akan berkurang. Hal ini dapat diketahui dengan prosedur inspeksi dan perawatan secara berkala [7].

Sebagai instrumen utama dalam sistem penggerak kapal, *propeller shaft* berguna untuk mengontrol gerakan dan memberikan manuver pada

kapal ketika mengarungi lautan [11]. Pada umumnya, sistem ini terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu mesin, *driving device*, *shaft*, dan *propeller*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 [4]. Nantinya mesin akan memberikan energi kepada *shaft*, sehingga dapat berputar untuk menggerakkan *propeller* [8]. Dengan berputarnya *propeller*, dimanfaatkanlah hukum newton III untuk memberikan dorongan terhadap air, sehingga menyebabkan terjadinya gaya aksi-reaksi yang dihasilkan antara air dan *propeller* yang nantinya dapat menggerakkan suatu kapal.



Gambar 1. *Typical Ship System Elements Rendering* [4]

Selama beroperasi, *shaft* akan mengalami berbagai pembebanan, seperti momen torsi, *bending*, gaya dorong axial, gaya gravitasi maupun sentrifugal [5]. Ketika bekerja di air, *propeller* juga akan menghasilkan gaya eksitasi akibat dari adanya aliran di sekitar buritan, kemiringan poros, dan juga kondisi laut yang tidak stabil. Gaya eksitasi ini menyebabkan getaran yang nantinya akan ditransmisikan melalui fluida di sekitarnya dan juga *shaft* itu sendiri. Getaran ini dapat mengakibatkan *fatigue failure* pada komponen kapal dan pengaruh yang buruk pada operasi normal kapal [2]. Akibat dari adanya berbagai hal tersebut, *shaft* akan mengalami perubahan temperatur yang disebabkan oleh panas hasil dari pergerakan *shaft* tersebut, sehingga dalam waktu yang cukup lama dapat berakibat terjadinya *fatigue* pada *shaft*. Tak hanya itu, desain *shaft* yang tidak sesuai dan kondisi lingkungan dimana *shaft* beroperasi juga dapat mempercepat terjadinya *fatigue failure* pada suatu *shaft*.

Studi dan analisa sebelumnya mengenai kegagalan struktur kapal laut telah menunjukkan bahwa persentase kegagalan yang signifikan disebabkan oleh desain yang tidak memadai karena kurangnya pertimbangan operasional, evaluasi elemen struktur yang tidak lengkap, dan penggunaan metode perhitungan yang salah. Maka dari itu dilakukan analisa kelelahan (*fatigue*) pada *shaft* guna meminimalisir kecelakaan yang terjadi, mengingat poros (*shaft*) bekerja sepanjang berjalannya kapal tentu tidak menutup kemungkinan akan terjadi sebuah kecelakaan maupun hambatan yang disebabkan oleh *fatigue*.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam analisa adalah baja tahan karat austenitik atau baja kromium-nikel

dengan kandungan nikel diatas 8% [3,8]. Baja pada paduan baja kromium-nikel memiliki kandungan karbon yang tergolong tinggi (0,99%) sehingga memiliki ketahanan yang tinggi terhadap gesekan. Selain itu unsur Cr dan Ni pada paduan ini meningkatkan kemampuan ketahanan terhadap korosi.

2.2. Metode Pengamatan

Pengamatan dilaksanakan melalui metode pendekatan kepustakaan (*library research*) terhadap berbagai literatur yang berkaitan dengan tema dan tujuan penelitian terkait Analisis *Fatigue Failure* pada *Shaft Propeller* sebagai Instrumen Utama Penggerak Kapal. Studi pustaka atau kepustakaan dapat diartikan sebagai serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat serta mengolah bahan penelitian [15]. Pengumpulan data dalam penelitian dilakukan dengan menelaah dan/atau mengeksplorasi beberapa Jurnal, buku, dan dokumen-dokumen (baik yang berbentuk cetak maupun elektronik) serta sumber-sumber data dan atau informasi lainnya yang dianggap relevan dengan penelitian atau kajian [12].

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan studi pustaka terhadap berbagai literatur, analisis kelelahan material pada *shaft propeller* dilakukan dengan berbagai tahap, yaitu membersihkan spesimen dengan campuran larutan HNO₃ 100ml, NaOH 20ml, dan reagen untuk menghilangkan karat dan pengotor pada spesimen, lalu dilakukan pengujian terhadap komposisi kimia yang terdapat pada spesimen dengan menggunakan alat XRF *Bruker S4 Pioneer*. Kemudian dilakukan uji kekerasan dengan metode *Rockwell* berdasarkan ASTM E-18 dan metode *Vickers* dengan gaya dibawah 5kg-force [8].

3.1. Komposisi

Pada Tabel 1 dapat dicermati bahwa material yang digunakan adalah besi krom-nikel tipe 316 dengan kandungan Cr hampir 16%, Ni sekitar 9%, dan Mn 1,07%. Sementara itu, pada Tabel 2 paduan memiliki kandungan Cr 20,91%, Ni 11,45, dan Mn 5,21%. Dengan cukup tingginya kandungan Cr, Ni, dan Mn pada paduan menghasilkan sifat yang tahan korosi, dan memiliki ketahanan pada suhu tinggi.

Kekerasan baja banyak dipengaruhi oleh unsur Cr dan Mn. Hal ini dikarenakan penambahan Cr ataupun Mn pada baja memungkinkan terbentuknya karbida besi (FeCr)₃C atau (FeMn)₃C. Karbida inilah yang membuat paduan baja yang digunakan pada *shaft* dapat terus bekerja dalam jangka waktu tertentu tanpa mengalami deformasi yang dapat memicu terjadinya kecelakaan atau kerusakan pada kapal dan instrumen kapal lainnya.

3.2. Analisis Getaran Torsi dan Aksial

Tingginya tingkat kebisingan dan getaran menjadi masalah klasik yang terjadi pada *engine-propeller watercraft* [6]. Getaran yang ditimbulkan oleh

mesin diesel kapal menghasilkan getaran torsional, yakni getaran yang terjadi dalam arah rotasi. Getaran torsional menjadi penyebab utama terjadinya kelelahan. Besarnya getaran torsional bergantung pada kondisi mesin ketika kapal berjalan. Semakin tinggi kecepatan kapal, semakin tinggi pula getaran torsionalnya [5]. Hal ini berarti harus ada kecepatan maksimum yang digunakan guna mengurangi angka getaran torsional yang terjadi ketika kapal beroperasi, sehingga dapat memperpanjang jangka waktu perawatan pada shaft atau batang baja yang digunakan. Beberapa parameter yang dapat meningkatkan tingginya getaran torsi antara lain adalah kekakuan kopling dan shaft juga basahnya kopling dan shaft [5].

Getaran aksial dari sistem propulsi pada kasus ini merupakan yang paling mungkin menyebabkan getaran paksa (forced vibration). Getaran paksa sifatnya sangat berbahaya karena dapat beresonansi ketika frekuensi getaran sama dengan frekuensi getaran sistem. Untuk itu sistem propulsi dapat menggunakan *multiple degree of freedom vibration* untuk dapat mereduksi getaran aksial yang terjadi pada sistem propulsi.

Selain itu, pembebanan yang dialami oleh sebuah shaft dapat menyebabkan terjadinya getaran. Pada penelitian yang dilakukan oleh Siva Sitthipong et al [11] ditemukan bahwa penyebab utama terjadinya *fatigue failure* adalah perubahan pembebanan yang konstan. Penggunaan kapasitas mesin yang melebihi batas dapat meningkatkan tegangan yang terjadi pada

sebuah *shaft*. Tak hanya itu, hal ini juga dipengaruhi oleh terjadinya konsentrasi tegangan pada area tertentu yang terpusat memicu perbesaran *crack* pada permukaan *shaft* jika diamati secara mikrostruktur.

Pembebanan pada kinerja mesin kapal menyebabkan tegangan tinggi yang terkonsentrasi. Tegangan ini dapat menyebabkan getaran yang bersifat destruktif dan memiliki probabilitas untuk menghasilkan *crack* yang lama kelamaan dapat menginisiasi terjadinya *fracture failure* jika *maintenance* tidak segera dilakukan.

Kerusakan akibat getaran torsional dan aksial [4] paling sering menyebabkan *fillet* (gurat), *deformation* (deformasi), dan *fracture* (patah) yang akan terjadi dalam proses kegagalan shaft adalah *fracture* akibat pembebanan secara kontinyu dan diikuti dengan kemunculan *crack* pada permukaan shaft dan akhirnya *shaft* tidak dapat menahan tegangan yang dialami hingga mengalami *fracture* menjadi dua bagian atau lebih, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.

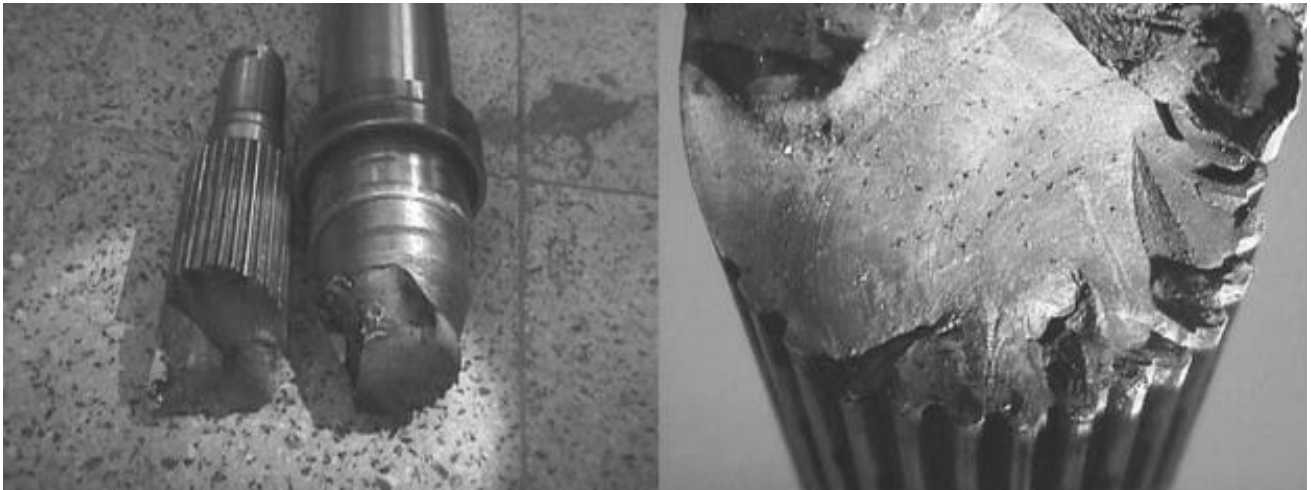
Crack yang dihasilkan dari getaran torsi dan aksial dapat merambat atau biasa disebut *crack growth* [13]. Perambatan retak dapat terjadi jika retak yang sudah ada tidak diketahui dan tidak ada tindakan lebih lanjut untuk proses *maintenance*. *Crack growth* dapat menyebabkan *fracture* secara mendadak ketika *shaft* terus menerus bekerja. Hal ini dikarenakan perputaran *shaft* akan selalu menghasilkan tegangan terpusat.

Tabel 1. *Chemical composition of the failed propeller shaft analysed using the WDXRF [8]*

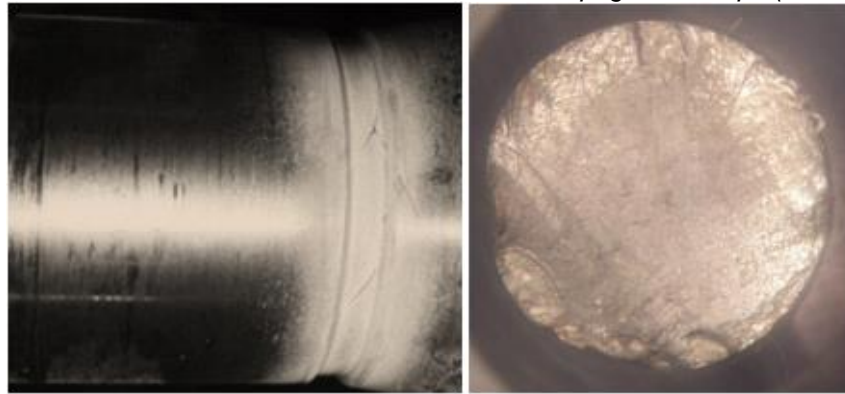
Element	Cr	Ni	Mo	Mn	C	Cu	Si	Co	V	P	Fe
Composition (%)	15.80	9.07	1.88	1.07	0.99	0.40	0.29	0.16	0.06	0.03	Remainder

Tabel 2. *Chemical composition of the shaft steel and approximate equivalent steel grade (wt.%) [3]*

Sample/Std	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Co	Nb	V
Shaft steel	0.0233	5.21	0.0037	0.0077	0.3086	20.91	11.45	2.087	0.0466	0.2829	0.1475	0.1709	0.1595
AISI XM-19/ S20910	≤0.06	4.00–6.00	≤0.030	≤0.040	≤0.75	20.50–23.50	11.50–13.50	1.50–3.00	...	0.20–0.40	...	0.10–0.30	0.10–0.30



Gambar 2. The Characteristic Torsion Failure Crack Propagation Shape (45° angle) [4]



Gambar 3. Shaft Fillet Failure Crack Shape [4]

Penelitian oleh V. Hellum et al [13], dilakukan penyelidikan terhadap intermediate propeller shaft yang mengalami fracture hanya dalam kurun waktu 20 bulan setelah digunakan. Fracture ini berada pada bagian silinder dari shaft dan tidak di sekitar terjadinya konsentrasi geometrical stress. Kemudian didapatkan bahwa fatigue failure pada propeller shaft terjadi karena adanya perambatan retakan yang diakibatkan oleh kecacatan pada permukaan shaft. Fracture yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat jelas beach mark yang terjadi, sehingga dapat disimpulkan bahwa fracture disebabkan oleh fatigue pada shaft.



Gambar 4. Patahan propeller shaft [13]

3.3. Desain Shaft

Desain dari sebuah *shaft* menjadi salah satu pertimbangan penting dalam terjadi *fatigue failure*. Dewasa ini, industri manufaktur membuat kapal yang lebih cepat dan ringan dengan mengurangi kekakuan *shaft* dan *propeller*. Akan tetapi, hal ini justru dapat menambah tingkat dari frekuensi dan amplitudo getaran. Maka dari itu, diperlukan desain yang sesuai agar terjadi getaran seminimal mungkin demi memperpanjang umur pakai. J. Firouzi et al [6] melakukan analisis matematika terapan terhadap *shafting system* menggunakan metode Galerkin dan didapatkan bahwa mempertimbangkan deformasi *blade* dapat membawa keuntungan dalam analisis masalah.

Dalam pembuatannya, desain, maksimal pembebanan dan komposisi material menjadi faktor yang mempengaruhi karakteristik *shaft*. Adapun daya tahan shaft menjadi salah satu hal yang diperhatikan dalam pembuatan desain shaft. Terdapat beberapa peraturan yang memuat hal-hal tersebut, antara lain adalah sebagai berikut.

1. DNV GL Rules for Classification Ships [13]
2. DNV GL-CG-0038 Calculation of shafts in marine applications [13]
3. China Classification Society (SC) [14]

3.4. Korosi

Di dalam air laut, *stainless steel* rentan terhadap *pitting and crevice corrosion*. Terjadi korosi lokal ini dapat menyebabkan *premature failure* pada shaft karena adanya pit dapat menginisiasi terjadinya *fatigue* [9]. Korosi pada *stainless steel* khususnya

pada instrumen penggerak kapal, dalam jurnal ini adalah *shaft*, memungkinkan untuk terjadi *stress corrosion cracking* yang menyebabkan kerusakan secara cepat dan mendalam terutama pada logam dan paduan logam seperti yang terjadi di bagian instrumen penggerak kapal. Sehingga kecelakaan kurang bisa diantisipasi jika tidak dilakukan maintenance secara berkala. Korosi pada shaft juga dapat terjadi akibat basahnya kopleng dan *shaft* oleh air laut.

Solusi yang paling mungkin digunakan adalah memadukan paduan yang digunakan sebagai bahan dasar *shaft* dan *propeller* yaitu kromium dan molybdenum yang merupakan paduan baja yang resisten terhadap korosi lokal dengan perlindungan katodik pada *shaft* dan *propeller* [9]. Selain itu, korosi lokal pada *shaft* dan *propeller* dapat dicegah dengan melakukan coating. Coating adalah proses mengaplikasikan lapisan khusus dibagian permukaan bagian kapal yang sudah dilapisi dengan cat warna dan dapat membuat lapisan lebih berkilau. Pada coating dilakukan dengan melapisi dengan senyawa non-korosif diantaranya adalah zinc dan rubber yang sangat tepat karena memiliki sifat perpaduan tahan terhadap suhu rendah.

4. Simpulan

Dari studi pustaka yang telah dilakukan, didapatkan bahwa

1. Semakin tinggi kandungan nikel, kromium, dan mangan pada suatu paduan, maka semakin baik properti mekanis yang akan dimilikinya.
2. Terjadinya getaran torsional dan aksial pada sebuah shaft dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti kecepatan kapal, pergerakan propeller, properti mekanis dari shaft, pembebanan yang dialami, dan cacat yang sudah ada pada shaft.
3. Beberapa hal yang mempengaruhi pembuatan desain shaft adalah maksimal pembebanan, komposisi material yang digunakan, dan daya tahan dari shaft itu sendiri. Berbagai peraturan mengenai pembuatan desain shaft telah diatur dalam DNV GL (Det Norske Veritas-Norwegia, Germanischer Lloyd-Jerman dan China Classification Society (SC).
4. Untuk mengurangi efek korosi pada fatigue failure pada sebuah shaft, maka dapat dilakukan perlindungan katodik atau coating sebagai usaha memperlambat laju korosi yang terjadi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada Program Studi Teknik Metalurgi Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Daftar Pustaka

- [1] Bai, Y. dan Jin, W.-L. 2016. *Marine Structural Design*. Amsterdam: Elsevier. ISBN 9780080999975

- [2] D. Zou, et al. 2020. Study on characteristics of propeller exciting force induced by axial vibration of propulsion shafting: Theoretical analysis. *Ocean Engineering*. 202 : 1-13.
- [3] G. Pantazopoulos. S. Papaefthymiou. 2015. Failure and Fracture Analysis of Austenitic Stainless Steel Marine Propeller Shaft. *J Fail. Anal. and Preven* 15:762–767.
- [4] G. Vizetin, et al. 2017. Common Failures of Ship Propulsion Shaft. *Scientific Journal of Maritime Research*. 31:85-90.
- [5] H. Han et al. 2015. Estimate of the fatigue life of the propulsion shaft from torsional vibration measurement and the linear damage summation law in ships. *Ocean Engineering*. 107 : 212-221.
- [6] J. Firouzi, H. Ghassemi, dan M. Shadmani. 2021. Analytical model for coupled torsional-longitudinal vibrations of marine propeller shafting system considering blade characteristics. *Applied Mathematical Modelling*. 94 : 737-756.
- [7] M. Ibrion, et al. 2021. Learning from failures in cruise ship industry: The blackout of Viking Sky in Hustadvika, Norway. *Engineering Failure Analysis*. 125
- [8] M. Moesli Muhammad, et al. 2020. *Fracture Failure Analysis of A Marine Propeller Shaft*. 13(2) : 240-246.
- [9] S. Lorenzi, et al. 2015. Cathodic protection modelling of a propeller shaft. *Corrosion Science*. 108 : 36-46.
- [10] Setz, H. L. 2009. The influence of corrosion on propeller shaft maintenance. *Journal of American Society for Naval Engineers*. 53(4) : 735-744.
- [11] Siva Sitthipong, et al. 2017. Failure analysis of metal alloy propeller shafts. *Materials Today*. 4 : 6491–6494.
- [12] Supriyadi. 2016. Community of practitioners : Solusi alternatif berbagi pengetahuan antar pustakawan. *Lentera Pustaka*. 2(2) : 83-93.
- [13] V. Hellum et al. 2021. Crack growth models for multiaxial fatigue in a ship's propeller shaft. *Engineering Failure Analysis*. 127 : 1-19.
- [14] X.-l. Xu and Z.-w. Yu. 2021. Failure analysis of a marine intermediate shaft. *Engineering Failure Analysis*. 126 : 2-11.
- [15] Zed, Mestika 2003. *Metode Penelitian Kepustakaan*. Jakarta : Yayasan Obor Indonesia.



Irhami Al Adaby mahasiswa semester 6 yang sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Metalurgi di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta. Memiliki ketertarikan pada hal-hal yang berkaitan dengan korosi dan fatigue failure.