

## ESTIMASI UMUR DAN PREDIKSI PERILAKU KELELAHAN POROS BALING-BALING KAPAL LCT ANDROS

Nuraini<sup>1</sup> dan Novitha L. Th. Thenu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pattimura, Ambon 97233

E-mail: [nuraini@gmail.com](mailto:nuraini@gmail.com)

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pattimura, Ambon 97233

Email : [novitha.thenu@fatek.unpatti.ac.id](mailto:novitha.thenu@fatek.unpatti.ac.id)

**Abstrak.** Poros baling-baling kapal LCT Andros telah direkondisi setelah mengalami keausan. Teknik untuk merekondisi poros melalui tahapan pengelasan dan pembubutan pada area yang mengalami keausan. Teknik pengelasan MMA (Manual Metal Arc) dapat menimbulkan konsentrasi energi spasial yang menghasilkan input panas yang cukup besar dapat menyebabkan distorsi, pengenceran yang signifikan pada zona yang terkena panas dan secara umum terjadi degradasi bahan dasar. Dengan mempertimbangkan resiko dari teknik pengelasan, maka pihak kapal harus memikirkan resiko kegagalan kelelahan pada poros baling-baling yang sudah direkondisi. Dengan demikian kondisi poros harus dapat diprediksi setelah direkondisi. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi umur dan prediksi perilaku kelelahan poros baling-baling kapal LCT Andros dimana estimasi umur poros diperoleh dari perhitungan teoritis dan prediksi kelelahan melalui simulasi numerik. Berdasarkan perhitungan teoritis umur poros setelah direkondisi yaitu 6,34 tahun dalam  $1,29 \times 10^9$  siklus sedangkan perkiraan umur dari hasil simulasi numerik pada software SolidWorks diketahui dengan jumlah siklus sebesar  $5.18 \times 10^8$  siklus atau 5 Tahun.

Kata kunci: Rekondisi Poros, Estimasi Umur Poros, Prediksi Perilaku Kelelahan

**Abstract.** The propeller shaft of the LCT Andros ship has been reconditioned after experiencing wear and tear. Techniques for reconditioning the shaft through the stages of welding and turning in areas that experience wear. MMA (Manual Metal Arc) welding techniques can generate spatial energy concentrations which produce a large enough heat input that can cause distortion, significant dilution of the heat-affected zone and in general degradation of the base material. By considering the risk of welding techniques, the ship must consider the risk of fatigue failure on the propeller shaft that has been reconditioned. Thus the condition of the shaft must be predictable after being reconditioned. This study aims to estimate the age and predict the fatigue behavior of the LCT Andros propeller shaft where the estimated shaft life is obtained from theoretical calculations and fatigue predictions through numerical simulations. Based on the theoretical calculation of the shaft life after being reconditioned, namely 6.34 years in  $1.29 \times 10^9$  cycles, while the estimated age from the results of numerical simulations in the SolidWorks software is known to be the number of cycles of  $5.18 \times 10^8$  cycles or 5 years.

Keywords: Shaft Reconditioning, Shaft Life Estimation, Fatigue Behavior Prediction

---

### 1. PENDAHULUAN

Rekondisi komponen permesinan didefinisikan sebagai langkah-langkah yang dilakukan pada komponen mesin untuk mengembalikannya menjadi komponen yang dimungkinkan dan sesuai dengan kebutuhan. Kejadian umum yang sering terjadi pada komponen mesin di kapal adalah

keausan pada permukaan komponen yang disebabkan oleh berbagai mekanisme. Pihak kapal seringkali memilih untuk memperbaiki komponen - komponen yang dapat diperbaiki atau merekondisi komponen untuk memungkinkan penggunaan kembali komponen tersebut. Pilihan ini diambil agar dapat mengurangi biaya operasional kapal atau

solusi sementara sambil menunggu pengiriman suku cadang. Masalah yang dijumpai di kapal LCT Andros adalah keausan pada poros propeler dan telah melalui proses rekondisi. Posisi keausan terdapat pada area bantalan. Pihak kapal melakukan rekondisi poros setelah proses pengukuran diameter poros dan dilanjutkan dengan pengelasan dan pembubutan ( Gambar 1) pada area yang mengalami keausan.



Gambar 1 Proses Pengelasan dan Pembubutan Poros Baling - Baling

Teknik pengelasan yang digunakan adalah MMA (*Manual Metal Arc*). Penggunaan teknik pengelasan MMA menimbulkan konsentrasi energi spasial yang timbul yang menghasilkan input panas yang cukup besar ke komponen. Hal ini dapat menyebabkan distorsi, pengenceran yang signifikan, pada zona yang terkena panas dan secara umum terjadi degradasi bahan dasar. Dengan mempertimbangkan akibat yang dapat ditimbulkan dari teknik pengelasan tersebut, maka pihak kapal harus memikirkan resiko yang akan terjadi pada poros yang telah direkondisi. Hal penting yang perlu dipikirkan adalah umur poros baling-baling yang akan dipakai setelah direkondisi. Kegagalan poros baling-baling dapat terjadi karena poros mengalami defleksi melintang dan lendutan, torsi [1], kegagalan permukaan seperti aus [2] yang merupakan mode kegagalan umum dari poros serta kelelahan kegagalan (*fatigue failure*) karena beban berulang atau kelebihan beban, konsentrasi tegangan [3], *clearance* yang tidak memadai dan pengaturan bantalan yang tidak tepat sehingga beban yang diterima oleh bantalan dan poros tidak merata. Reparasi poros baling-baling merupakan salah satu solusi untuk mempertahankan penggunaan poros sebagai penerus daya, Reparasi yang dilakukan untuk memperbaiki kondisi poros yang aus, retak dan korosi. Kondisi poros yang cacat sebenarnya dapat dideteksi lebih awal, hal ini didukung oleh beberapa penelitian yang berkaitan dengan pengujian non destruktif untuk keretakan yang terjadi pada poros baling-baling [4], korosi [5]. Kegagalan karena kelelahan poros dapat terjadi karena sejumlah siklus pembebanan [6], kemudian kegagalan poros dapat dianalisis untuk mengetahui

penyebab kegagalan dengan mengikuti prosedur standar [7]. Pada intinya, kegagalan komponen sistem propulsi kapal dapat menyebabkan konsekuensi buruk bagi kapal, muatan dan orang-orang yang berada di atas kapal. Khusus kegagalan struktur kapal dan sistem propulsi dapat dicatat bahwa kegagalan dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (suhu, lingkungan yang korosif), desain atau pengerjaan yang buruk (khususnya yang berkaitan dengan pengelasan), tidak memadai desain atau perakitan (garis poros) atau kelelahan sering kali disertai dengan getaran torsional yang berfluktuasi [9]. Inilah sebabnya kita perlu mempelajari kegagalan komponen sistem propulsi untuk mencegah resiko buruk. terhadap Dengan demikian, umur kelelahan poros baling-baling yang telah direkondisi perlu diketahui agar kita dapat memprediksi perilaku kegagalan yang akan terjadi pada poros.

## 2. BAHAN DAN METODE

### 2.1. Sistem Perporosan

Sistem perporosan merupakan suatu perangkat sistem transmisi tenaga yang berfungsi mentransmisikan daya dari motor induk ke baling-baling sehingga menghasilkan daya dorong yang membuat kapal dapat bergerak. Sistem ini merupakan bagian dari sistem propulsi kapal sehingga memiliki peranan penting di dalam operasional. Oleh sebab itu, kemampuan sistem ini untuk beroperasi secara normal haruslah dipertahankan. Daya yang dihasilkan oleh mesin induk diteruskan dalam bentuk putaran melalui serangkaian poros ke baling-baling. Rangkaian poros itu disebut shafting atau sistem perporosan.

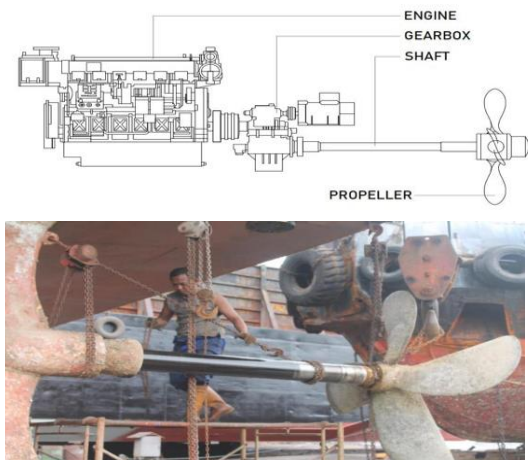


Gambar 2 Kapal LCT Andros

Kapal LCT Andros (Gambar 2) merupakan kapal jenis Landing Craft Tank (LCT) berbendera Indonesia 1240 GT, yang melayani operasional jasa untuk wilayah timur Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi dan sekitarnya. Jasa yang dilayani seperti pengangkutan kayu, semen, pasir dan beberapa macam jasa pengangkutan lainnya.

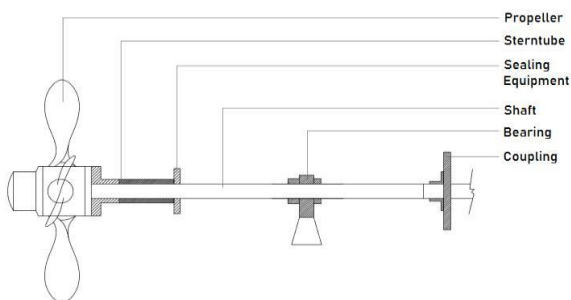
Sistem perporosan Kapal LCT Andros hanya memiliki poros baling – baling dan tidak terdapat

poros antara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Sistem Poros LCT Andros

Pada poros baling-baling kapal LCT Andros terpasang baling-baling, stern tube, seal, bantalan dan kopling flens seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Sketsa Elemen - elemen yang Terpasang pada Poros Baling - baling Kapal LCT Andros

**2.2. Material Poros**

Bahan poros baling - baling berdasarkan data yang diperoleh adalah menggunakan material baja karbon ST41. Tabel 1 menunjukkan komposisi material baja karbon ST41 dan sifat mekanik bahan poros ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 1 Unsur-unsur Baja Karbon ST41

Kode	C%	Si%	Mn%	Mo%	P%	S%
AISI	0,4-	0,1 –	0,6 –	0,025	0,04	0,05
1045	0,45	0,3	0,9		Max	Max

Tabel 2 Sifat mekanis Baja Karbon ST41

Kekerasan HRc	Tegangan Tarik MPa	Tegangan Luluh, MPa	Elongation	Modulus Elastisitas, GPa
64	600	500	26	207

**2.3. Perhitungan Teoritis**

Pada perhitungan ini, diasumsikan bahwa poros umumnya bekerja pada kondisi mengalami beban defleksi dan torsi. Metode perhitungan untuk kondisi poros yang mengalami beban defleksi dan torsi dapat berupa pendekatan perkiraan, namun masih merupakan estimasi yang cukup untuk memeriksa keseluruhan situasi poros. Torsi poros (T), dihitung berdasarkan persamaan (1).

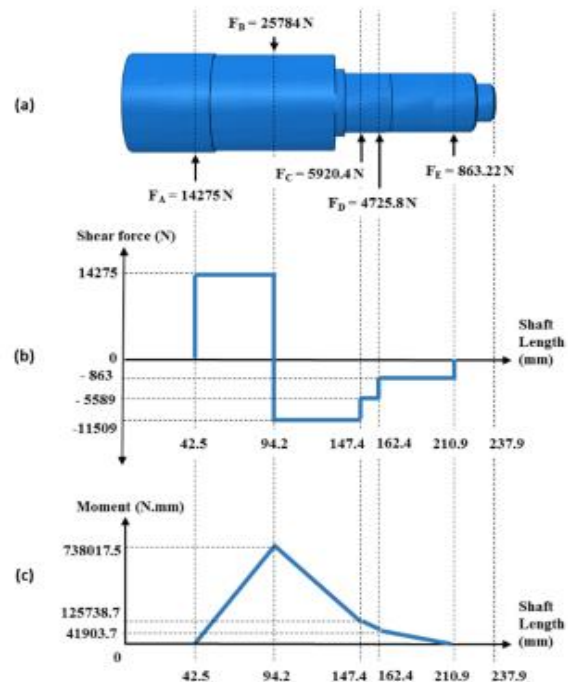
$$T = \frac{60 \times P}{\pi \times 2 \times n} \tag{1}$$

Dimana:

n = putaran mesin = 1200 Rpm

P = Daya mesin = 350000 Hp

Pada langkah analisis gaya, lima titik pada poros dipertimbangkan. Titik-titik ini adalah posisi bantalan (A), posisi rantai (B), posisi bantalan pertama (C), posisi bantalan kedua (D), dan posisi kunci (E). Gaya reaksi (F) dan momen (M) pada setiap titik dihitung menurut persamaan (2) dan (3). Hasil yang dihitung ditampilkan seperti contoh pada Gambar 5.



Gambar 5 (a) Diagram benda bebas, (b) Diagram gaya geser, (c) Diagram momen lentur [8]

Gaya reaksi (F) dan momen (M) pada setiap titik dihitung menurut persamaan (2) dan (3).

$$\sum F = 0 \tag{2}$$

$$\sum M = 0 \tag{3}$$

Tegangan Von Mises pada kondisi beban lentur dan torsi gabungan dihitung menurut persamaan (4),

sedangkan pada kondisi beban torsi murni dihitung menurut persamaan (5) :

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{32 K_{fb} M_b}{\pi d^3}\right)^2 + 3 \left(\frac{16 T_m}{\pi d^3}\right)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_d = \sqrt{3(\tau_{max})^2} \quad (5)$$

Dimana :

$\sigma_d$  , = adalah tegangan von mises,

$M_d$  , = momen lentur

$K_{fb}$  = faktor konsentrasi tegangan kelelahan

$d$  = diameter poros

$T_m$  = momen torsi

$\tau_{max}$  = tegangan geser maksimum

$K_{fb}$  dapat diperoleh menurut persamaan (6) :

$$K_{fb} = 1 + q(K_t - 1) \quad (6)$$

Dimana  $K_t$  adalah faktor konsentrasi tegangan geometris dan  $q$  adalah faktor sensitivitas takik yang diperoleh menurut :

$$q = 1 \div (1 + \sqrt{a} / \sqrt{r}) \quad (7)$$

Defleksi linear dan kemiringan dihitung menurut persamaan (8) - (10) dengan menggunakan teknik integrasi numerik. Di mana  $M$  adalah momen yang diterapkan pada poros,  $E$  adalah modulus elastisitas, dan  $I$  adalah momen inersia area penampang.  $M$  dan  $I$  adalah fungsi dari geometri poros.

$$\text{Momen Function} = \frac{M}{EI} \quad (8)$$

$$\text{Slop} (\theta) = \int \frac{M}{EI} dx + C \quad (9)$$

Deflection

$$\delta = \iint \frac{M}{EI} dx + D + G \quad (10)$$

Sudut defleksi dihitung berdasarkan persamaan (11), di mana  $L$  adalah panjang poros,  $G$  adalah modulus geser,  $J$  adalah momen inersia kutub, dan  $T$  adalah torsi

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (11)$$

#### 2.4. Kriteria Kegagalan Kelelahan/Fatik (Fatigue Failure Criteria)

Untuk memperkirakan kriteria kegagalan fatik dari material poros, batas ketahanan teoritis kelelahan (the theoretical fatigue endurance limit),  $S'_e$  dihitung berdasarkan persamaan (12).

$$S'_e = 0,5 \times S_{ut} \quad (12)$$

Dimana :

$S_{ut}$  = kekuatan tarik material ST41 = 530 Mpa,

Untuk menentukan batas ketahanan kelelahan yang dikoreksi  $S_e$ , faktor koreksi hingga batas daya tahan teoritis harus dipertimbangkan.

$$S_e = C_{load} \times C_{size} \times C_{surf} \times C_{temp} \times C_{reliability} \times S'_e \quad (13)$$

Dimana :

$C_{load}$  (faktor koreksi beban) = 1 (untuk Bending )

$C_{size}$  (faktor koreksi ukuran) =  $1.189 d^{-0,097}$   
untuk  $8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm}$

$C_{size} = 4.51 \times S_{ut}^{0,625}$

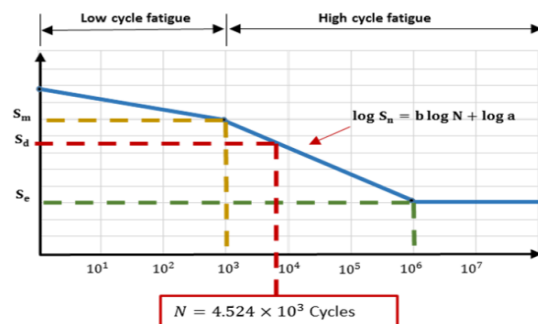
$C_{temp}$  (faktor koreksi temperatur) = 1 x untuk  $T \leq 450 \text{ C}^0$

$C_{reliability}$  (faktor koreksi keandalan) = 0,897

Untuk memperkirakan umur kelelahan (N) poros dan perilaku kelelahan, maka digunakan diagram tegangan-siklus (S-N). Dua nilai kekuatan harus ditentukan dalam menggambar diagram S-N. Pertama, kekuatan material ( $S_m$ ) di  $N \leq 10^3$ , dan kedua, kekuatan material ( $S_e$ ) di  $N \geq 10^6$ . Nilai Kekuatan material di  $N \leq 10^3$  dihitung sesuai dengan persamaan (14), dan nilai kekuatan material di  $N \geq 10^6$  adalah batas kelelahan terkoreksi yang dihitung sebelumnya.

$$S_m = 0,9 S_{ut} \text{ untuk bending} \quad (14)$$

Perkiraan diagram S-N ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai contoh perhitungan. Dengan menggunakan faktor desain industri yang khas, poros bekerja pada kondisi tegangan maksimum dalam satuan MPa dan untuk tegangan ini, umur kelelahan poros dapat ditentukan dalam satuan siklus. Dari Gambar 6 diperoleh tegangan maksimum sebesar 357 MPa dan umur kelelahan poros  $4.524 \times 10^3$  siklus.



Gambar 6 Diagram siklus tegangan S-N [8]

Langkah-langkah membuat tegangan-siklus (S-N) merupakan pendekatan pertama untuk memahami fenomena kelelahan logam. Penyajian data

kelelahan poros dengan menggunakan kurva S-N yaitu dengan pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan (N). Kurva S-N ini lebih diutamakan menggunakan skala semi log seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada poros.

Perkiraan umur material poros baling-baling kapal dapat ditentukan dengan persamaan (15) sebagai berikut :

$$\text{Fatigue Life} = \frac{\text{Design Life}}{D_m} \times \text{years} \quad (15)$$

Dimana :

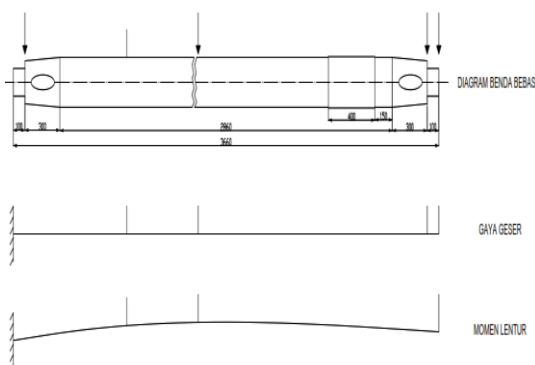
$$D_m = \frac{N_L}{N_i} \quad (16)$$

$$N_L = \frac{0,85 \times T_L}{4 \log L} \quad (17)$$

Dimana *Design life* merupakan umur standar dari poros baling-baling, yakni 25 tahun sesuai aturan klasifikasi.  $D_m$  merupakan *cumulative fatigue damage*.  $N_L$  merupakan total jumlah siklus yang direncanakan untuk 25 tahun.  $N_i$  merupakan jumlah siklus sesuai analisis,  $L$  adalah panjang  $L_{PP}$  kapal sebesar 68.80 meter, dan  $T_L$  adalah nilai siklus beban material poros baling-baling selama *Design life* tersebut dalam bentuk siklus.

## 2.5 Poros Kapal Lct Andros

Diagram benda bebas poros kapal LCT Andros, ditunjukkan pada Gambar 7, dimana pada bagian A terdapat diagram bebas yang juga diberi arah pembebanan, kemudian selanjutnya pada bagian B ada gaya geser dan terakhir adalah bagian C yaitu momen lentur.



Gambar 7 Diagram benda bebas poros Lct Andros

## 2.6. Simulasi SolidWorks

Software SolidWorks digunakan untuk perancangan elemen mesin yang dapat melakukan pemodelan 2 Dimensi (2D) dan 3 Dimensi (3D) poros baling-baling.

Terdapat beberapa jenis analisis yang dapat dilakukan oleh *Solidworks Simulations Premium diantaranya: Static, Frequency, Topologi Study, Design Study, Thermal, Buckling, Fatigue, Nonlinier, Linier Dynamic, Submodeling, Drop Test, Pressure Vessel Design.*

### 2.6.1. Langkah Analisis Pada SolidWorks

Langkah analisis dengan SolidWorks dilakukan untuk mengetahui perilaku poros. Proses analisis dilakukan dengan memberi beban statik pada poros. Secara rinci, langkah-langkah analisis dapat dilakukan sebagai berikut:

1. *Pree-Processor*. Pada langkah ini dilakukan penentuan jenis analisis, pemberian kondisi batas (*boundary condition*) suatu bagian (*part*), pemberian beban (*load*), penentuan tumpuan (*fixture*), penentuan spesifikasi material, meshing dan pemberian koneksi.
  - a. Jenis analisis yang digunakan pada perangkat lunak solidworks 2019 adalah *static analysis*.
  - b. Jenis tumpuan yang digunakan adalah *fixed geometry*,
  - c. Jenis beban yang diberikan adalah *forced* dengan satuan Newton. Beban normal sebesar 2786,62 N/m dimasukkan ke dalam menu *forced*.
2. *Meshing*. Tahap ini dilakukan dengan menggunakan menu *Curvature-based mesh* agar nodal lebih detail pada bagian poros. *Mesh density* yang diterapkan adalah pada kondisi *fine* agar ukuran elemennya kecil sehingga mempengaruhi perhitungan yang didapatkan semakin detil. Jenis elemen yang dilakukan adalah *solid element*.
3. *Running*. Tahap ini dilakukan setelah *pree-processor*, dimana komputer akan membaca langkah-langkah yang sudah dilakukan dan menghitungnya dengan metode Finite Element (*finite element method*) secara numerik hingga mencapai hasil yang konvergen.
4. *Post-Processing*. Tahap ini dapat ditampilkan ketika proses *running* selesai dan hasil yang ditampilkan valid. *Post-processing* dapat ditampilkan sesuai jenis analisis yang digunakan. Pada analisis statik, hasil yang ditampilkan berupa tegangan (*von misses stress*), deformasi (*displacement*), faktor keamanan (*factor of safety*), gaya dan momen reaksi (*force and moment reaction*) dan umur (*life*).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Perhitungan Analitik

Perhitungan Torsi Poros menggunakan persamaan (1).

$$\text{Torsi Poros, } T = \frac{60 P}{\pi \cdot n}$$

Dimana:

$$P = \text{daya mesin} = 350000 \text{ Hp}$$

$$n = \text{putaran mesin} = 1200 \text{ Rpm}$$

Sehingga :

$$\text{Torsi Poros, } T = \frac{60 \times 350000}{3,14 \times 2 \times 1200} = 2786,62 \text{ Nm}$$

Perhitungan Gaya Poros menggunakan persamaan:

$$F_B = \frac{2T}{D} = \frac{2 \times 2786,62}{0,18} = 300962,5 \text{ N}$$

Dimana:

$$T = \text{torsi poros} = 2786,62 \text{ Nm}$$

$$D = \text{diameter poros} = 0,18 \text{ m}$$

Perhitungan Tegangan Von Mises menggunakan persamaan (4):

Tegangan Von Mises,

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{32 K_{fb} M_b}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16 T_m}{\pi d^3}\right)^2}$$

Dimana:

$$M_b, \text{ momen lentur} = 0,001$$

$$K_{fb}, \text{ faktor konsentrasi tegangan kelelahan} = 1,653$$

$$T_m, \text{ momen torsi} = 3888212$$

$$D, \text{ diameter poros} = 0,18$$

Tegangan Von Mises:

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{32 \times 1,653 \times 0,001}{3,14 \times 0,18^3}\right)^2 + \left(\frac{16 \times 3888212}{3,14 \times 0,18^3}\right)^2}$$

$$= 3397213245$$

Perhitungan Faktor Konsentrasi Tegangan Kelelahan menggunakan persamaan (6) :

Faktor Konsentrasi Tegangan Kelelahan,

$$K_{fb} = 1 + q(K_t - 1)$$

Dimana:

$$q, \text{ faktor sensitivitas takik} = 0,653$$

$$K_t, \text{ faktor konsentrasi tegangan geometris} : 1,5 - 2$$

$$K_{fb} = 1 + 0,653(2 - 1) = 1,653$$

Perhitungan Faktor Sensitivitas Takik menggunakan persamaan (7):

$$q = 1 \div (1 + \sqrt{a} / \sqrt{r})$$

Dimana:

$$a, \text{ luas penampang} = 0,025434$$

$$r, \text{ radius} = 0,09$$

$$q = 1 \div \left(1 + \frac{\sqrt{0,025434}}{\sqrt{0,09}}\right) = 0,653$$

Perhitungan defleksi linear dan kemiringan menggunakan persamaan 8:

$$\text{Momen Function} = \frac{M}{EI} = \frac{2786,62}{187,5 \times 0,025434} = 0,377$$

Sudut defleksi dihitung berdasarkan persamaan (11):

$$\theta = \frac{TL}{GJ} = 457,74$$

Dimana :

$$L, \text{ panjang poros} = 3660 \text{ mm}$$

$$G, \text{ modulus geser} = 8,4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$J, \text{ momen inersia} = 0,377$$

$$T, \text{ torsi} = 2786,62 \text{ Nm}$$

Untuk memperkirakan kriteria kegagalan fatik dari material poros, batas ketahanan teoritis kelelahan  $S'_e$  dihitung berdasarkan persamaan (12).

$$S'_e = 0,5 \times S_{ut} = 265 \text{ MPa}$$

Dimana :

$$S_{ut} = \text{kekuatan tarik material ST41} = 530 \text{ Mpa}$$

Perhitungan Kelelahan/Fatik (Fatigue Failure Criteria) menggunakan persamaan (13):

$$S_e = C_{load} \times C_{size} \times C_{surf} \times C_{temp} \times C_{reliability} \times S'_e$$

Dimana:

$$C_{load}, : 1 \text{ (untuk bending)}$$

$$C_{size}, : 1,187 d^{-0,097} \text{ untuk } 8\text{mm} < d \leq 250 \text{ mm}$$

$$: 4.51 \times S_{ut}^{0,265} = 0,83$$

$$C_{temp} : 1 \text{ x untuk } T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_{reliability} : 0,987$$

$$C_{surf} : 0,84$$

$$S'_e : 250$$

$$S_m : 450$$

Kelelahan/Fatik,

$$S_e = 1 \times 147,4 \times 0,84 \times 1 \times 0,987 \times 265 = 31,99$$

Untuk menghitung nilai kekuatan material digunakan persamaan (14)

$$S_m = 0,9 S_{ut} = 0,9 \times 530 \text{ MPa} = 477 \text{ MPa}$$

Perhitungan Umur Poros menggunakan persamaan (15, 16, 17):

$$\text{Fatigue Life} = \frac{\text{Design Life}}{D_m} \times \text{years}$$

$$D_m = \frac{N_L}{N_i}$$

$$N_L = \frac{0,85 \times T_L}{4 \log L}$$

Dimana :

Design Life, Umur standar dari poros = 25 tahun

$N_i$  , Jumlah siklus sesuai analisis =  $7,96 \times 10^6$

$L$  , panjang Lpp kapal = 68,80 meter

$T_L$  , Nilai siklus beban material poros selama design life = 7963

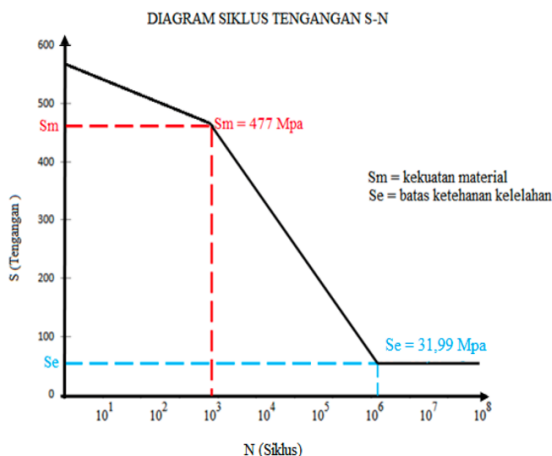
$$N_L = \frac{0,85 \times T_L}{4 \log L} = 31,4 \times 10^8$$

$$T_L = \frac{N_L \times 4 \log L}{0,8} = \frac{31,4 \times 10^8 \times 4 \log 68,80}{0,8} = 2,88 \times 10^9$$

Cumulatif fatigue damage

$$D_m = \frac{N_L}{N_i} = \frac{31,4 \times 10^8}{7,96 \times 10^6} = 3,94$$

$$\text{Fatigue Life} = \frac{\text{Design life}}{D_m} \times \text{years} = 6,34 \text{ Tahun}$$



Gambar 8 Diagram Siklus S-N

Untuk memperkirakan umur kelelahan (N) poros dan perilaku kelelahan, maka digunakan diagram tegangan-siklus S-N (Gambar 8). Dua nilai kekuatan harus ditentukan dalam menggambar diagram S-N. Pertama, kekuatan material ( $S_m$ ) = 477 Mpa di  $N \leq 10^3$ , dan kedua, kekuatan material ( $S_e$ ) =

31,99 Mpa di  $N \geq 10^6$ . Nilai Kekuatan material di  $N \leq 10^3$  dihitung sesuai dengan persamaan (14), dan nilai kekuatan material di  $N \geq 10^6$  adalah batas kelelahan terkoreksi yang dihitung sebelumnya.

### 3.2. Perilaku Kelelahan Poros dengan Menggunakan Simulasi SolidWorks

#### 3.2.1. Proses Pemodelan Poros

Tahap awal sebelum masuk ke dalam simulasi yaitu dengan melakukan pemodelan poros. Pada awal pemodelan, poros digambar dalam bentuk 2D dan kemudian dibuat ke bentuk 3D.

Setelah tahap pemodelan dalam 2D selesai, langkah selanjutnya adalah pemodelan poros dalam bentuk 3D dengan memindahkan *key point* pada software berbasis *Finite Element* sehingga terbentuklah gambar 3D pada software *Finite Element* tersebut. Dalam pemodelan 3D poros baling-baling Kapal LCT Andros ini dibuat menjadi satu komponen yang menjadi satu sistem utama. Semua pemodelan 3D dilakukan menggunakan bantuan *solidworks 2016*.

#### 3.2.2. Material Propertis

Setelah pemodelan kemudian dilakukan pemilihan material yang merupakan hal penting dalam merencanakan komponen permesinan. Tabel 3 menginformasikan pemilihan material yang akan digunakan pada software ini. Material poros Kapal LCT Andros terbuat dari material ST41. Pada *SolidWork* tidak terdapat material dengan bahan ST41 sehingga pemilihan material melalui pendekatan material propertis yang mendekati bahan ST4. Material poros yang dipilih adalah *AISI 1045 Steel Cold Drawn* seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Properties Material

Properties	
Name	AISI 1045 Steel, cold drawn
Model Type	Linear Elastic Isotropic
Default failure criterion	Max von Mises Stress
Yield Strength	5,3e+08 N/m <sup>2</sup>
Tensile Strength	6,25e+08 N/m <sup>2</sup>
Elastic Modulus	2,05e+11 N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0,29
Mass density	7.850 kg/m <sup>3</sup>
Shear modulus	8e+10 N/m <sup>2</sup>
Termal expansion coefficient	1,15e-05/Kelvin

Input data material dilakukan sesuai dengan kebutuhan, analisa yang digunakan menggunakan material AISI 1045.

**3.2.3. Connector Definition**

Untuk membuat *conector* klik *Static Default* lalu pilih *Insert*, kemudian pilih *conection advisor* selanjutnya pilih *bearing*. Pada *conector* ini ada 3 pilihan yang bisa kita pakai di antaranya ada *pint*, *bolt* dan *bearing connector*. Pada simulasi ini menggunakan *bearing connector*.

**3.2.4. Loads and Fixtures**

Tahapan selanjutnya adalah tahapan analisis yaitu menentukan boundary conditions (kondisi batas). Diawali dengan menentukan fixture (penumpu). Penumpu ini merupakan lawan dari torsi. Dengan penumpu ini, kita dapat mengetahui besaran puntiran pada poros. Pada analisis ini digunakan penumpu (*Fixed Geometry*) yang diletakkan pada virtual bearing yang dikunci sebagai acuan.

Untuk memilih letak tumpuan pilih *Static Devault* kemudian pilih *Insert*, setelah itu pilih *Fixed Support*. Pada kotak *Geometri* pilih bagian poros yang menjadi tumpuan setelah itu kemudian klik *Apply*. Setelah menentukan tumpuan, langkah selanjutnya adalah input gaya dengan cara pilih *Static Devault* lalu pilih *External loads* kemudian *Insert* dan pilih *Torque*.

**3.2.5. Meshing**

Tabel 4. Informasi mesh

Informasi Mesh	
Mesh Type	Solid Mesh
Meshes Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	28,3761 mm
Tolerance	1,4188 mm
Mesh Quality Plot	High
Jacobian points	40874
Total Nodes	26542
Total Elements	14,016
Maximum Aspect Ratio	98,9
% of elements with Aspect Ratio < 3	0,143
% of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements(Jacobian)	Solid Mesh

Untuk menganalisa suatu pemodelan metode *Finite Element* adalah dengan melakukan diskritisasi

(*meshing*), yaitu dengan membagi struktur permodelan tersebut menjadi elemen-elemen kecil (*Finite Element*) yang terhubung oleh titik-titik atau nodes yang dipakai oleh elemen-elemen tersebut sebagai batas dari struktur objek. Berbagai informasi menyangkut proses *meshing* ditampilkan pada Tabel 4.

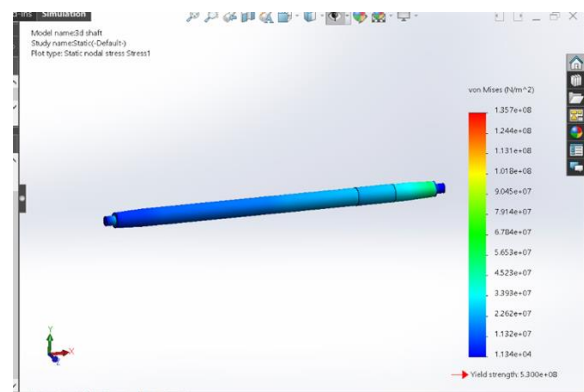
Pada analisis ini digunakan standard mesh yang mempunyai ukuran elemen 28,3761 mm.



Gambar 9 Solid mesh poros

**3.2.6. Von Mises Stress**

Setelah dilakukan *meshing* selanjutnya adalah proses *running*. Simulasi yang digunakan adalah statis (*static study*). Langkah pertama dalam melakukan proses von mises yaitu dengan pilih *static devault* kemudian pilih *result* dan klik *von mises stress*. Hasil yang diperoleh dari proses *running* ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Tegangan von mises

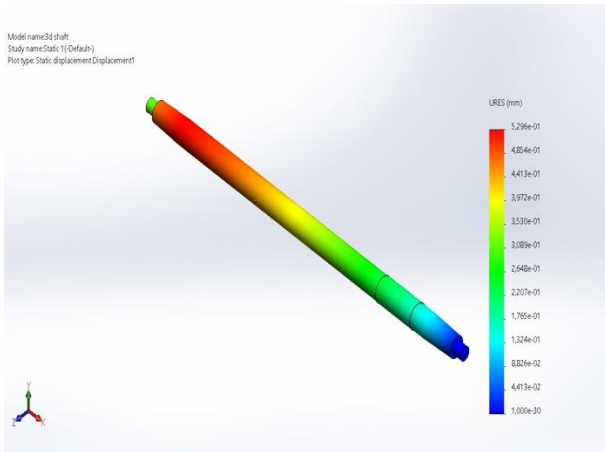
Besaran tegangan yang terjadi pada poros baling-baling Kapal LCT Andros adalah sebesar 1,373e+08 N/m<sup>2</sup>.

**3.2.7. Displacement**

Selanjutnya *displacenment* pilih *static default* kemudian pilih *result* dan klik *displacement*. Nilai displacement yang didapat adalah sebesar 5,296e-01 mm, besaran displacement ditunjukkan oleh warna.



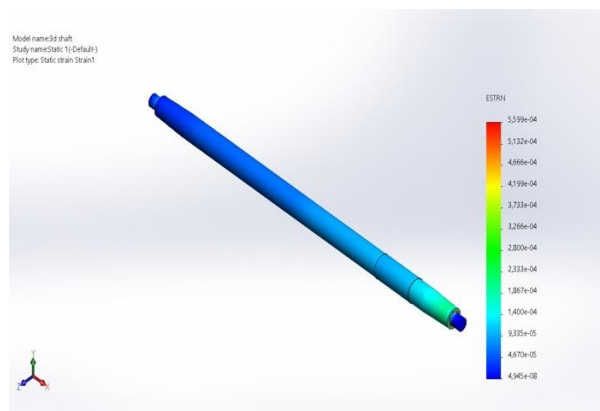
Semakin tinggi nilai displacementnya maka warna pada bagian komponen semakin merah, semakin kecil maka akan semakin berwarna biru. Hasil yang diperoleh dari proses *displacement* ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Displacement

**3.2.8. Von Mises Equivalent**

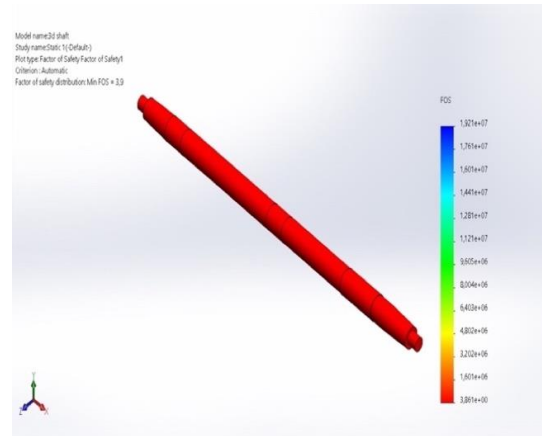
Selanjutnya untuk tahapan *Von Mises Equivalent* dilakukan dengan cara memilih static default kemudian pilih result dan klik *equivalent*. Nilai equivalent yang didapat adalah sebesar 5,599e-04. Hasil yang diperoleh dari proses *equivalent* ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Von mises equivalent.

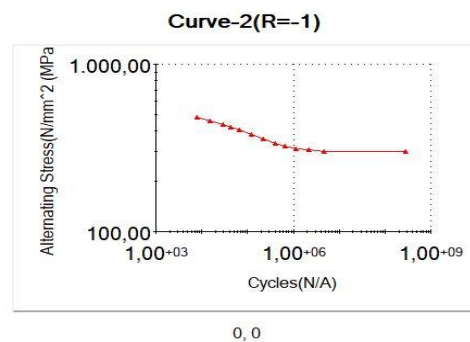
**3.2.9. Safety Factor**

Faktor keamanan atau safety factor yaitu merupakan sebuah aspek dalam dunia keteknikan yang digunakan untuk mengukur atau menilai batas kemampuan suatu bahan akibat beban dari luar (*external load*) seperti beban torsi yang bekerja terhadapnya.



Gambar 13 Factor Safety

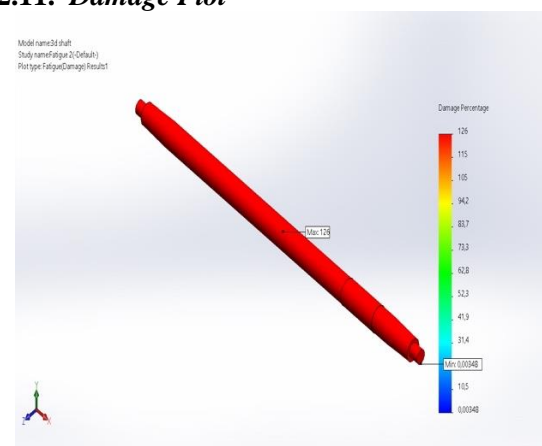
**3.2.10. Fatigue Simulation**



Gambar 14 Kurva S-N

Kurva S-N pada Gambar 14 menunjukkan hubungan antara kegagalan terhadap siklus, sampai pada siklus ke berapa material mengalami kerusakan. Pada kurva S-N dapat dilihat bahwa hasil simulasi pengujian menunjukkan kegagalan terjadi pada siklus 1,00+09 siklus.

**3.2.11. Damage Plot**



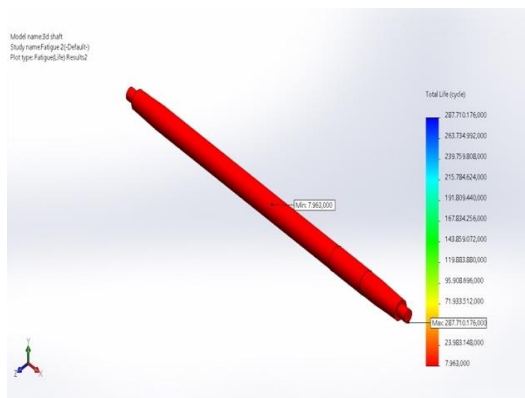
Gambar 14 Damage plot

Damage yang terjadi pada poros dapat dilihat pada Gambar 14. Dari simulasi didapatkan hasil bahwa seluruh bagian poros berwarna merah dengan nilai

damage min 0,00348, sedangkan nilai maksimum 126 pada bagian tengah poros seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14

**3.2.12. Life Plot**

Life yang terjadi pada poros LCT Andros dapat dilihat pada Gambar 15. Dari simulasi didapatkan hasil bahwa seluruh daerah poros berwarna merah dengan nilai life yaitu 287,710,176,000 cycle dan ada juga titik minimum life terdapat pada daerah poros bagian tengah yang tampak pada Gambar 15 dengan nilai life yaitu 7,963,000 cycle.



Gambar 15 Life plot

Gambar 15 menunjukkan bahwa nilai siklus terpendek hasil analisis ( $N_i$ ) dari hot spot stress pada poros baling-baling sebesar  $7,96 \times 10^6$  siklus. Nilai siklus terpendek hasil running pada software dapat digunakan untuk menentukan umur material poros baling-baling dengan menggunakan persamaan first - order fatigue cycle. Berikut perhitungan persamaan first - order fatigue cycle [10] sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{first - order fatigue cycle} &= \\ \text{rpm} \times 60 \text{ minutes} \times 24 \text{ hours} \times \text{operating days in a year} \\ &= 1200 \times 60 \times 24 \times 3000 \\ &= 5,18 \times 10^8 \text{ cycle atau 5 tahun} \end{aligned}$$

Nilai siklus beban yang dialami oleh poros baling-baling kapal LCT Andros selama 1 tahun didapatkan sebesar  $5,18 \times 10^8$  cycle. Lalu dilakukan perhitungan jumlah siklus hingga 25 tahun, sehingga didapatkan nilai siklus yang dialami oleh poros baling-baling, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Hubungan siklus dan tahun

Time	Number of Cycles
1 <sup>st</sup> year	$1,29 \times 10^8$
5 <sup>th</sup> year	$6,48 \times 10^8$
10 <sup>th</sup> year	$1,29 \times 10^9$
25 <sup>th</sup> year	$3,24 \times 10^9$

**3.3. Pembahasan**

Dari hasil perhitungan teoritis diketahui umur poros setelah direkondisi yaitu 6,34 tahun dalam siklus  $1,29 \times 10^9$ . Perkiraan umur dari hasil analisis numerik pada software solidworks diketahui dengan jumlah siklus sebesar  $5,18 \times 10^8$  siklus atau 5 Tahun. Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan software solidwoks yang telah dilakukan terhadap poros baling-baling kapal LCT Andros maka didapatkan hasil tegangan von mises, displacement dan von mises equivalen. Nilai Tegangan von mises ditunjukkan pada Gambar 10 yang menunjukkan bahwa nilai tegangan von mises yang terjadi pada poros baling-baling kapal LCT Andros sebesar  $1,373 \text{ N/m}^2$  (MPa) sedangkan nilai tegangan von mises equivalen adalah sebesar  $5,599 \text{ N/m}^2$  (MPa) yang ditunjukkan pada Gambar 12.

**4. KESIMPULAN**

Hasil perhitungan teoritis memperkirakan umur poros setelah direkondisi yaitu 6,34 tahun dalam siklus  $1,29 \times 10^9$ . Sedangkan perkiraan umur dari hasil analisis pada software SolidWorks dengan jumlah siklus sebesar  $5,18 \times 10^8$  atau 5 tahun. Kegagalan yang terjadi pada poros disebabkan karena faktor kelelahan. Kelelahan pada poros tersebut disebabkan karena beban yan terjadi adalah beban dinamis berupa torsi yang dialami poros. Melalui simulasi SolidWorks dapat diprediksi perilaku kelelahan poros sebagai berikut: besar tegangan Von Misses yang terjadi pada poros baling-baling Kapal LCT Andros adalah sebesar  $1,373 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ; Nilai displacement yang didapat adalah sebesar  $5,296 \times 10^{-1} \text{ mm}$ , besaran displacement ditunjukkan oleh warna. Semakin tinggi nilai displacementnya maka warna pada bagian komponen semakin merah, semakin kecil maka akan semakin berwarna biru; kurva S-N hasil simulasi pengujian menunjukkan kegagalan terjadi pada siklus  $1,00 \times 10^9$  siklus dan simulasi Life plot didapatkan hasil bahwa seluruh daerah poros berwarna merah, nilai life yaitu 287.710.176.000 cycle dan titik minimum life terdapat pada daerah poros bagian tengah yaitu 7,963,000 cycle.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] Satriananta, M. G., Hartono Yudo, Berlian Arswendo Adietya, (2019), Studi Analisis Kekuatan Poros Propeller Kapal KMP Pertiwi Nusantara Akibat Dikenai Torsi Dari Propeller, Semarang.

- [2] Hendrawan Andi, (2019), Analisa Penyebab Keausan Poros Baling-Baling Kapal, Jurnal Sainara Volume 4 No. 1.
- [3] Hariom, Vijai Kumar, Chandrababu D., (2016). A Review of Fundamental Shaft Failure Analysis, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 03.
- [4] Suandi Andi, Abdul Raul Fentje, Lumintang Romels, (2016), Tinjauan Berbagai Keretakan Pada Poros Propeller Baling-Baling Kapal Dengan Menggunakan Proses Non Destructive Testing, Jurnal Online Poros Teknik Mesin, p 46- 57, Volume 5 Nomor 2.
- [5] Kuznetsov, A. and S Ivanchik, (2021), Flaw detection of ship equipment parts, Journal of Physics: Conference Series, Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021.
- [6] Myeong-Ho Song, Xuan Duong Pham and Quang Dao Vuong, (2020), Torsional Vibration Stress and Fatigue Strength Analysis of Marine Propulsion Shafting System Based on Engine Operation Patterns, Journal Marine Science and Engineering, Volume 8.
- [7] Muhammad, M. M., Mohd Subhi Din Yati, Nik Hassanuddin Nik Yusoff and Mahdi Che Isa, Fracture Failure Analysis of A Marine Propeller Shaft, Defence S And T Technical Bulletin, October 2020, P. 240-246
- [8] Engel B, Sara Salman Hassan Al-Maeni. (2017), Failure Analysis and Fatigue Life Estimation of a Shaft of a Rotary Draw Bending Machine, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering ,Vol:11, No:11.
- [9] Vizentin, Goran., Goran Vukelic ,Lech Murawski, Naman Recho, Josip Orovic, (2020), Marine Propulsion System Failures-AReview, Journal Marine Science and Engineering, Volume 8.
- [10] Ridho, M., Zakki, A. F., & Manik, P., (2015), Analisa Fatigue propeller Tugboat Ari 400hp Dengan Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik Perkapalan, 3(1), 110–117.