

ANALISA KEKUATAN DAN UMUR KELELAHAN *SHAFT* *PROPELLER* KAPAL SPOB

An Analysis of Strength and Fatigue Life of Propeller Shaft SPOB Ship

Alamsyah¹, Amalia I. W.¹ dan Ivan Fadillah¹

¹Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan

Email: alamsyah@itk.ac.id

Diterima: 09 Desember 2019; Direvisi: 02 Januari 2020; Disetujui: 02 Maret 2020

Abstrak

Makalah ini membahas tentang kekuatan, putaran dan umur kelelahan dari poros *propeller* kapal *SPOB*. Poros *propeller* yang dirancang harus cukup aman untuk menahan beban-beban yang bekerja saat beroperasi yang berefek pada umur kelelahan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan dan umur kelelahan poros *propeller*. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Hasil penelitian didapatkan nilai tegangan *von mises (equivalent)* pada poros *propeller* adalah sebesar 203.05 MPa dan tegangan geser sebesar 93.52 MPa. Nilainya di bawah tegangan izin pada poros *propeller* yakni 104.67 MPa untuk tegangan izin geser dan 209.34 MPa untuk tegangan izin *von mises*. Sedangkan *fatigue life* poros *propeller* yakni 16.33 tahun dengan siklus tegangan sebesar 3.24×10^9 .

Kata kunci: elemen, hingga, *propeller*, kelelahan

Abstract

This paper discusses the strength, rotation and fatigue life of the SPOB Shaft propeller vessel. The Shaft Propeller which is designed must be safe enough to withstand the loads - operating loads that affect the fatigue life. The purpose of this research was to determine the strength and fatigue life of propeller shafts. The application of finite element software is applied on this study. The results showed that the value of von mises stress (equivalent stress) on propeller shafts is 203.05 MPa and shear stress is 93.52 MPa. Values below the allowed stress on the propeller shaft are 104.67 MPa for the allowed shear stress and 209.34 MPa for the allowed stress of von mises. While the fatigue life of the propeller shaft is 16.33 years with a stress cycle of 3.24×10^9 .

Keywords: element, finite, propeller, fatigue

PENDAHULUAN

Barge atau *pontoon* adalah suatu jenis kapal yang dengan lambung datar atau suatu kotak besar yang mengapung, digunakan untuk mengangkut barang dan

ditarik dengan kapal tunda atau digunakan untuk mengakomodasi pasang-surut seperti pada dermaga apung (Manning, 1968). *Barge* pada umumnya tidak memiliki sistem pendorong seperti kapal pada

umumnya, namun ada jenis *barge* yang memiliki sistem propulsinya sendiri seperti *Self-Propelled Barge*. Tongkang ini berbeda, karena memiliki tenaga penggerak sendiri, dengan bentuk kapal yang basisnya sama dengan kapal tongkang dan biasanya dioperasikan pada perairan dangkal maupun sungai (Prayoga & Aryawan, 2016). SPOB digunakan mengangkut *crude oil* yakni minyak bumi yang mana dalam bahasa Indonesia adalah cairan kental yang berwarna berkisar dari kuning pucat hingga merah dan coklat hingga hitam atau kehijauan, sementara oleh cahaya yang dipantulkan, dalam sebagian besar kasus, berwarna hijau serta memiliki sifat mudah terbakar (Manning, 1968; Chougle & Walke, 2015).

Kapal yang beroperasi harus memiliki kemampuan dalam mempertahankan kecepatan dinas (V_s) sesuai dengan yang direncanakan. Kapal harus mempunyai rancangan sistem propulsi (penggerak) yang dapat mengatasi keseluruhan gaya-gaya hambat (*total resistance*) yang terjadi dalam memenuhi standar kecepatan dinasnya. Secara umum, sistem propulsi kapal terdiri dari tiga komponen utama, yakni motor penggerak utama (*main engine*), sistem transmisi dan alat gerak (*propulsor*) (Santosa, 2016).

Sistem transmisi di kapal merupakan sistem dimana daya yang dihasilkan dari motor penggerak utama, yakni *main engine* akan diteruskan menuju *propulsor* agar dapat menggerakkan kapal melalui gaya tekan yang dihasilkan oleh *propulsor*. Salah satu komponen utama dalam sistem transmisi adalah poros *propeller* sehingga banyak aspek yang harus diperhatikan pada poros *propeller* saat bekerja sebagai komponen sistem transmisi pada kapal, yakni mulai dari kekuatan dan juga kekakuan dari poros *propeller* itu sendiri (Adji, 2006).

Gaya yang bekerja pada poros adalah gaya dorong dari *propeller* untuk mendorong kapal (*thrust*), momen torsi akibat putaran *propeller*, berat *propeller*, dan berat dari pada poros itu sendiri (Yulianto & Ariesta, 2019). Akibat dari gaya-gaya yang timbul tersebut, maka poros *propeller* harus mampu menahan gaya yang bekerja padanya, sehingga poros tidak mengalami deformasi yang melebihi batas yang diizinkan. Sifat material, sifat geometris dan proses manufaktur dapat mempengaruhi kualitas suatu desain (Zhang et al., 2005), sehingga pemilihan material yang tepat untuk poros *propeller* dapat mempengaruhi kinerjanya dalam sistem propulsi kapal.

Poros *propeller* akan mengalami *fatigue* akibat pembebanan secara terus menerus, kemudian

perpatahan terjadi karena ketika material telah mengalami siklus tegangan yang menghasilkan kerusakan permanen sebagai proses perubahan struktur permanen pada satu titik menjadi retak (*crack*) (M. & Septian, 2018). Mekanisme patah lelah terdiri atas 3 tahap kejadian yaitu: a) tahap awal terjadinya retakan (*Crack Initiation*), b) tahap penjalaran retakan (*Crack Propagation*), dan c) tahap akhir kerusakan/patah (*Final Fracture*) (Rahmatullah & Ahmad, 2018). Kelelahan material poros *propeller* sangat penting untuk diperhatikan, dimana hal ini dapat menyebabkan deformasi yang besar dan juga berujung pada patahnya dari poros *propeller*. Untuk dapat mengantisipasinya, dapat dilakukan dengan memperkirakan umur kelelahan dari material pada poros *propeller*. Menentukan umur kelelahan poros *propeller* bisa dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan analisis tegangan pada poros dengan memberikan variasi kondisi pembebanan kerja mesin yang menyebabkan tegangan terjadi pada poros. Tegangan yang terjadi didapatkan dari analisis numerik dengan menggunakan pendekatan elemen hingga (Nubly & Yudo, 2017). Penelitian menggunakan putaran *main engine* maksimum dalam menentukan kekuatan dan umur kelelahan poros *propeller*.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan pada poros *propeller* kapal SPOB dengan menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan nilai kekuatan poros *propeller* dan nilai siklus tegangan sehingga umur kelelahan dapat ditentukan. Dalam melakukan analisa kekuatan dan menentukan umur kelelahan poros *propeller* dilakukan beberapa tahapan.

Tabel 1. Data Permesinan Kapal SPOB

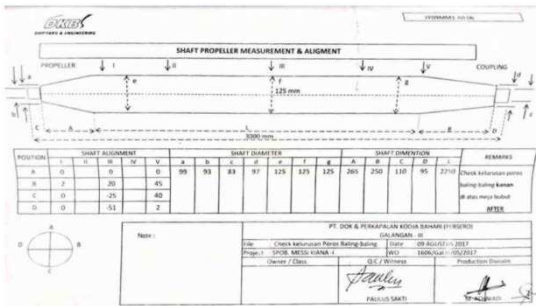
Nama	Nilai	Satuan
<i>BHP</i>	480.00	HP
<i>SHP</i>	399.84	HP
<i>DHP</i>	391.00	HP
<i>EHP</i>	328.44	HP
<i>RPM</i>	300.00	RPM
<i>Shaft length</i>	3000.00	MM
<i>Shaft diameter</i>	125.00	MM
<i>Gearbox ratio</i>	6 : 1	

(sumber: PT. Era Salvindo (2019))

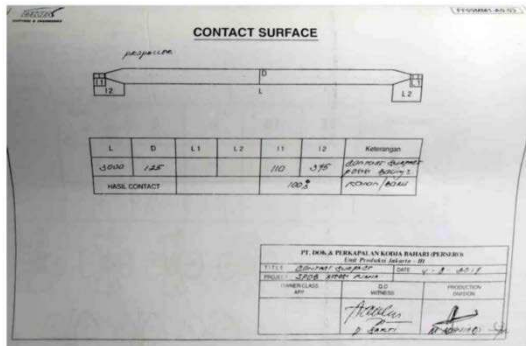
Tahapan pertama dilakukan pengumpulan referensi berupa publikasi ilmiah, jurnal-jurnal

penelitian, dan buku yang memiliki keterkaitan dengan proses penelitian tentang operasi penggunaan aplikasi dengan basis elemen hingga. Pengumpulan data-data sekunder seperti data permesinan kapal *SPOB* yang dijadikan sampel pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan data permesinan kapal *SPOB* berupa nilai *EHP*, *DHP* dan beberapa data lainnya. Sketsa konstruksi poros baling-baling kapal *SPOB* dan *free body diagram* ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai berikut:



(a)



(b)

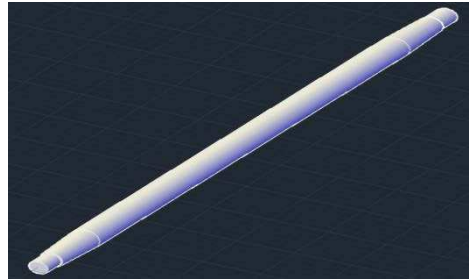
Gambar 1. a) Data detail measurement poros; b) Dimensi poros berupa nilai L dan D

Selain data permesinan, didapatkan juga data *mechanical properties* dari poros *propeller* yang ditunjukkan pada Tabel 2 sebagai berikut (Danismanlik, Muhendislik Ltd. Sti., 2010):

Tabel 2. Data *mechanical properties material AISI 304*

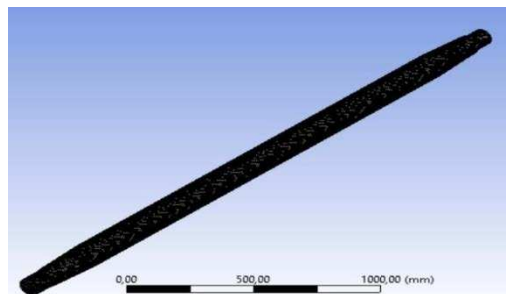
Nama	Nilai	Satuan
<i>Yield strength</i>	215	MPa
<i>Ultimate strength</i>	505	MPa
<i>Density</i>	8000	kg/m ³
<i>Elastic modulus</i>	193	GPa
<i>Shear modulus</i>	86	GPa

Tahapan kedua yaitu pengolahan data mulai dari permodelan *propeller* dengan menggunakan bantuan *software CAD* hingga menganalisisnya dengan bantuan *software* berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*. Pengolahan data yang dilakukan yakni dengan melakukan pemodelan 3D dari poros *propeller* kapal *SPOB* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan 3D poros *propeller*

Tahapan ketiga adalah melakukan analisa lebih lanjut data poros *propeller* dengan memindahkan *key point* gambar 3D pada *CAD* ke *software* berbasis elemen hingga sehingga terbentuklah gambar 3D pada *software* elemen hingga tersebut. Pada aplikasi berbasis elemen hingga poros *propeller* akan mengalami perlakuan *meshing* yakni merupakan proses diskritisasi dimana objek *meshing* akan dibagi menjadi beberapa bagian sehingga setiap elemen pada objek *meshing* akan diatur jarak antar elemen tersebut. Jarak antar elemen pada proses *meshing* tersebut dinamakan *meshing size*. Semakin kecil jarak antar elemen yang digunakan, maka akan terbentuk lebih banyak elemen dan *node* pada objek *meshing*, begitu juga sebaliknya. *Meshing size* berpengaruh dalam proses analisis ini dimana semakin kecil jarak antar elemen yang digunakan, maka waktu *running* aplikasi yang digunakan juga akan semakin lama, namun hasil analisis yang didapatkan juga akan semakin akurat.



Gambar 3. Model 3D poros *propeller* saat *meshing*

Dalam penelitian kali ini, *meshing size* atau juga dikenal dengan *body sizing* yang digunakan adalah

sebesar 8 mm. Hal ini menunjukkan bahwa jarak antar elemen yang digunakan pada *meshing* kali ini adalah sebesar 8 mm. Penentuan *meshing size* ditunjukkan pada Gambar 3.

Setelah proses *meshing* dilakukan pada model 3D maka diberikan kondisi batas meliputi tumpuan dan beban-beban yang diderita pada poros saat beroperasi. Pembebanan diberikan pada model sedemikian rupa agar dapat menyamakan dengan keadaan lapangan yang dialami oleh poros *propeller*. Pada model poros *propeller* ini, digunakan tumpuan yang mendekati kondisi sesungguhnya dengan membebaskan salah satu sumbu putar searah panjang poros namun hasilnya *error* ketika di lakukan *running*. Peneliti berusaha mendekati kondisi sebenarnya dengan menggunakan tumpuan *fixed support* yang diletakkan pada ujungnya untuk memudahkan pembacaan *software*. Sedangkan untuk kondisi pembebanannya diberikan pembebanan yang akan dimasukkan pada *software* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Nilai *input* beban pada *software*

Jenis Beban	Nilai	Satuan
<i>Thrust</i>	204380	N
<i>Torsional moment</i>	9176	N.m

Untuk menentukan nilai beban *thrust* (dorong) dan *torsional moment* digunakan persamaan sebagai berikut (Lewis, 1988):

$$T = \frac{EHP}{(1 - t) \cdot V_s} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{DHP \times 75 \times 60}{2\pi \cdot n} \quad (2)$$

Dimana *thrust* didapatkan dari *effective horse power* ($EHP = 328.44 \text{ Hp}$) yang berbanding terbalik dengan *deduction factor* ($t = 0.318$) dan berbanding lurus dengan kecepatan (V_s). M_t adalah momen torsi (Kg.m), *delivery horse power* ($DHP = 391 \text{ Hp}$) adalah *delivery horse power* (HP), n adalah *rpm gearbox*. Hasil analisa akan didapatkan berupa tegangan yang terdiri atas tegangan geser (σ_y) dan tegangan *von mises* (σ_v) pada poros *propeller*.

Tahapan keempat yakni menentukan kekuatan poros *propeller* dengan melihat faktor keamanan yang sesuai. Faktor keamanan atau dikenal juga dengan istilah *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

tekan dan juga beban tarik, yang bekerja terhadapnya. Kemampuan maksimal dari bahan tersebut dalam menahan beban luar yang bekerja terhadapnya sehingga terjadi fenomena kepecahan dari bahan tersebut dikenal dengan istilah beban maksimal (*ultimate load*) yang kemudian dari beban akhir ini bisa didapatkan kekuatan maksimal (*ultimate strength*) atau tegangan maksimal (*ultimate stress*) (Hutama dkk., 2016). Berdasarkan pengertian secara umum dari faktor keamanan, besarnya tegangan yang terjadi harus bernilai lebih kecil dari pada tegangan yang diizinkan terjadi (*allowable stress*) seperti terlihat pada persamaan berikut (Biro Kalasifikasi Indonesia, 2013):

$$\text{Safety Factor} = \frac{\sigma_{ijin}}{\sigma_{terjadi}} \quad (3)$$

Tahapan kelima adalah menentukan umur kelelahan (*fatigue life*) poros *propeller*. Dalam kasus desain pada *propeller*, untuk menentukan *fatigue life* dari *propeller*, perlu untuk mempertimbangkan bahwa data setidaknya memiliki siklus sebesar 10^8 , lebih banyak lebih baik (Carlton, 2007). Perkiraan umur material dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Fatigue Life} = \frac{\text{Design Life}}{DM} \times \text{years} \quad (4)$$

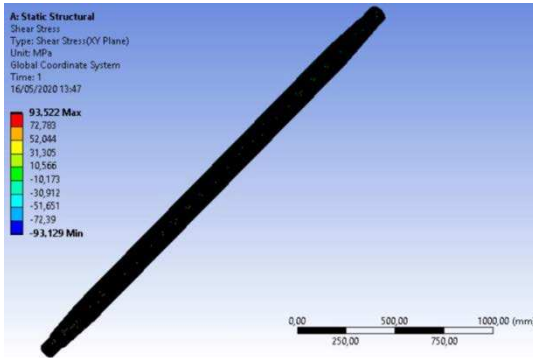
$$DM = \frac{N_L}{N_i} \quad (5)$$

$$N_L = \frac{0.85 \times T_L}{4 \log L} \quad (6)$$

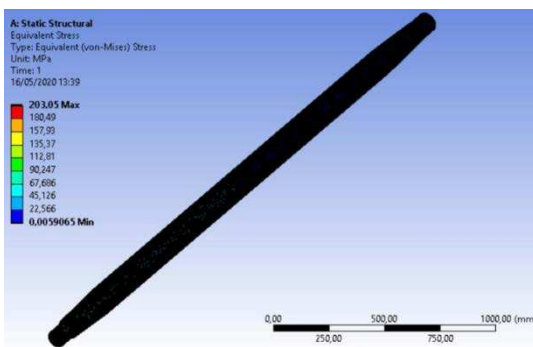
Dimana *design life* merupakan umur standar dari *propeller*, yakni 25 tahun sesuai aturan klasifikasi. DM merupakan *cumulative fatigue damage*. N_L merupakan total jumlah siklus yang direncanakan untuk 25 tahun. N_i merupakan jumlah siklus sesuai hasil analisis, L adalah panjang L_{pp} kapal sebesar 51.98 meter, dan T_L adalah nilai siklus beban material *propeller* selama *design life* tersebut dalam bentuk siklus sebesar 3.24×10^9 (Ridho dkk., 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* berbasis elemen hingga yang telah dilakukan terhadap poros *propeller* kapal SPOB maka didapatkan hasil tegangan yang terdiri atas tegangan geser (σ_y) dan tegangan *von mises* (σ_v) pada poros *propeller*. Tegangan geser dan *von mises* yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

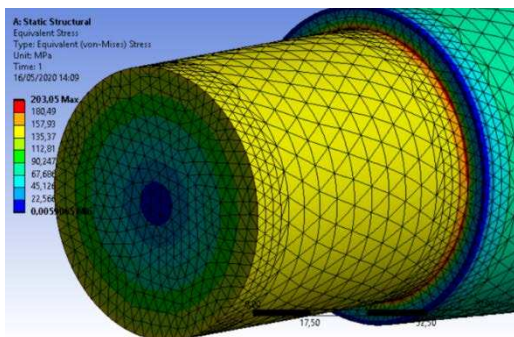


Gambar 4. Tegangan geser poros *propeller*



Gambar 5. Tegangan *von mises* (equivalent) poros *propeller*

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai tegangan geser yang terjadi pada poros *propeller* adalah sebesar 93.52 MPa. Sedangkan nilai tegangan *von mises* (equivalent) yang terjadi pada poros *propeller* adalah sebesar 203.5 MPa.



Gambar 6. Letak *hot spot stress* yang terjadi pada poros *propeller*

Jika dilihat secara lebih dekat, maka dapat dilihat bahwa nilai tegangan terbesar berada di daerah ujung poros *propeller* yang merupakan letak *hot spot stress*

pada poros *propeller*. Letak *hot spot stress* pada poros *propeller* ditunjukkan pada Gambar 6.

Dari Gambar 5 dapat diperhatikan bahwa warna merah yang menyatakan letak tegangan terbesar pada poros *propeller* terletak di tepi bagian ujung poros *propeller* dengan nilai 203.05 MPa. Dari nilai tegangan yang telah didapatkan melalui bantuan *software*, kemudian dibandingkan dengan tegangan ijin pada poros *propeller* yang bertujuan untuk menentukan faktor keamanan dari poros *propeller*. Untuk menentukan faktor keamanan poros *propeller* terlebih dahulu ditentukan perhitungan material faktor. Perhitungan nilai *factor material* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Biro Klasifikasi Indonesia, 2018):

$$C_w = \frac{560}{R_m + 160} \quad (7)$$

$$C_w = 0.842$$

R_m adalah *minimum tensile strength* dari material. Kemudian faktor keamanan (SF) didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$SF = C_w \times PF \quad (8)$$

$$SF = 1.027$$

Position factor (PF) adalah pengaruh letak dengan nilai untuk *shaft* = 1.22, *lubricating* = 1.40 dan *keyway* = 1.26, berdasarkan perhitungan tersebut akan dikalikan dengan *yield strength* material untuk mendapatkan tegangan ijin. Perhitungan tegangan ijin ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{iy} = \frac{\sigma_{yield}}{2 \times SF} \quad (9)$$

$$\sigma_{iy} = 104.67 \text{ Mpa (tegangan ijin geser)}$$

$$\sigma_{iv} = \frac{\sigma_{yield}}{SF} \quad (10)$$

$$\sigma_{iv} = 209.34 \text{ Mpa (tegangan ijin equivalent/von mises)}$$

Nilai tegangan ijin dari poros *propeller* $SPOB$ adalah sebesar 104.67 MPa untuk tegangan geser dan juga sebesar 209.34 MPa untuk tegangan *von mises*. Nilai tegangan ijin tersebut berada di atas nilai tegangan yang terjadi pada model poros *propeller* yang dianalisa menggunakan *software* berbasis elemen hingga yakni sebesar 203.05 MPa untuk tegangan *von mises*, dan 93.52 Mpa untuk tegangan geser. Perbandingan antara tegangan yang terjadi dan

tegangan ijin ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut:

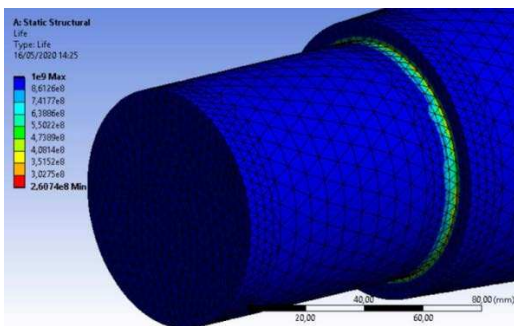
Tabel 4. Tegangan ijin vs tegangan maksimum analisa *FEM*

Item	σ_y max (MPa)	σ_v max (MPa)	σ_{iy} max (MPa)	σ_{iv} max (MPa)
Shaft	93.05	203.05	104.67	209.34

Tabel 4 menunjukkan nilai tegangan *von mises* (σ_v) dan tegangan geser (σ_y) dari poros *propeller* dan juga nilai tegangan ijin untuk tegangan *von mises* (σ_{iv}) serta tegangan ijin untuk tegangan geser (σ_{iy}). Hal ini menjelaskan bahwa kekuatan poros *propeller* kapal SPOB dengan material AISI 304 berdiameter 125 mm menghasilkan tegangan geser dan tegangan *von mises* yang masih memenuhi tegangan yang diizinkan oleh klasifikasi. Selain nilai tegangan, hasil analisis pada *software* bisa menunjukkan nilai siklus tegangan dengan menambahkan pilihan *fatigue tool*. Dengan ini, nilai siklus yang dialami oleh poros *propeller* dapat diketahui saat poros menerima pembebanan. Nilai siklus yang dialami oleh poros *propeller* kapal SPOB ditunjukkan pada Gambar 7.

Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai siklus terpendek hasil analisis (N_i) dari *hot spot stress* pada poros *propeller* sebesar 2.60×10^8 siklus. Nilai siklus terpendek hasil *running* pada *software* dapat digunakan untuk menentukan umur material poros *propeller* dengan menggunakan persamaan *first-order fatigue cycle*. Berikut perhitungan persamaan *first-order fatigue cycle* (Ridho dkk., 2015) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{First-order fatigue cycle} &= \text{rpm} \times 60 \text{ minutes} \\ &\times 24 \text{ hours} \times \text{operating days in a year} \quad (11) \\ &= 300 \times 60 \times 24 \times 300 \\ &= 1.29 \times 10^8 \text{ cycle} \end{aligned}$$



Gambar 7. Tampilan nilai siklus yang dikeluarkan oleh *software*

Nilai siklus beban yang dialami oleh poros *propeller* selama 1 (satu) tahun didapatkan sebesar 1.29×10^8 cycle. Lalu dilakukan perhitungan jumlah siklus hingga 25 tahun, sehingga didapatkan nilai siklus yang dialami oleh poros *propeller* ditunjukkan pada Tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5. Hubungan siklus dan waktu

Time	Number of cycles
1 st year	1.29×10^8
5 th year	6.48×10^8
10 th year	1.29×10^9
25 th year	3.24×10^9

Tabel 5 menunjukkan nilai siklus yang dialami oleh poros *propeller* selama 25 tahun (T_L) adalah sebesar 3.24×10^9 siklus. Berdasarkan nilai siklus terpendek yang dihasilkan oleh *software* elemen hingga dan nilai siklus perkiraan yang dialami oleh poros *propeller* yang ditunjukkan pada Tabel 5, maka perhitungan umur kelelahan dapat dimulai dengan menghitung akumulasi nilai kelelahan (*DM*) untuk mencari nilai *fatigue life* dari poros *propeller* kapal SPOB. Perkiraan umur kelelahan poros *propeller* bisa ditentukan dengan persamaan (4), (5) dan (6) sehingga didapatkan nilai total jumlah siklus yang direncanakan selama 25 tahun (N_L) = 4.01×10^8 cycle, akumulasi nilai kelelahan (*DM*) = 1.5 dan *fatigue life* sebesar 16.33 tahun.

KESIMPULAN

Nilai tegangan *von mises* pada poros *propeller* adalah sebesar 203.05 MPa dan tegangan geser sebesar 93.52 MPa. Nilainya di bawah nilai tegangan ijin pada poros *propeller* yakni sebesar 104.67 MPa untuk tegangan ijin geser dan 209.34 MPa untuk tegangan ijin *von mises*. Perkiraan umur kelelahan dari material poros *propeller* yang dianalisis pada saat pembebanan adalah sebesar 16.33 tahun dengan jumlah siklus tegangan sebesar 3.24×10^9 siklus.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan terima kasih kepada PT. Era Salvindo dan Laboratorium Perencanaan Desain Gambar Konstruksi dan Permesinan Kapal Program Studi Teknik Perkapalan Institut Teknologi Kalimantan yang telah memfasilitasi penelitian ini hingga *paper* ini bisa dipublikasikan. Serta terima kasih juga kepada *reviewer* yang tidak diketahui namanya sehingga *paper* ini layak dipublikasikan sebagai karya ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, S. W. (2006). Retrieved November 1, 2019, from Pengenalan Sistem Propulsi Kapal: https://www.academia.edu/6952523/PENGENALAN_SISTEM_PROPULSI_KAPAL?auto=download.
- Biro Kalasifikasi Indonesia. (2013). *Volume II Rules for the Classification and Construction. Part 1 Seagoing Ships*. Jakarta: PT. Biro Klasifikasi Indonesia.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2018). *Volume III Rules for Machinery Installations*. Jakarta: PT. Biro Klasifikasi Indonesia.
- Carlton, J. (2007). *Marine Propellers and Propulsion 2nd Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Chouge, S., & Walke, S. M. (2015). Generations of Crude Oil. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, Vol. 4(10)*, 309-313.
- Danismanlik, Muhendislik Ltd. Sti. (2010). Retrieved November 1, 2019, from Stainless Steel - Grade 304: <https://www.dm-consultancy.com/TR/dosya/1-59/h/aisi-340-info.pdf>
- Hutama, M. H., Yudo, H., & Iqbal, M. (2016). Analisa Kelelahan Rantai Jangkar dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 638-648.
- Lewis, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture*. Jersey City: Society of Naval Architects & Marine Engineers.
- M., M., & Septian, R. (2018). Analisa Pengujian Lelah Material Stainless Steel 304 Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, Vol. 1(1)*, 64-73.
- Manning, G. C. (1968). *The Theory and Technique of Ship Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Nubly, M. H., & Yudo, H. (2017). Strength Analysis of Propeller Shafting on Orca Class Fisheries Inspection Boat using Finite Element Method. *International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 8(10)*, 1599-1610.
- Prayoga, N. B., & Aryawan, W. D. (2016). Desain Self-Propelled Oil Barge (SPOB) Untuk Distribusi Crude Oil di Kabupaten Sorong, Papua Barat. *Jurnal Teknik ITS, Vol. 5(1)*, G19-G24.
- PT. Era Salvindo. (2019). *Data Permesinan Kapal SPOB (Messi Kianna 1)*. Jakarta: PT. Era Salvindo.
- Rahmatullah, & Ahmad, R. (2018). Analisa Pengujian Lelah Material Bronze Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, Vol. 1(1)*, 1-11.
- Ridho, M., Zakki, A. F., & Manik, P. (2015). Analisa Fatigue Propeller Tugboat Ari 400HP dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan, Vol. 3(1)*, 110-117.
- Santosa, M. G. (2016). Propulsi Kapal dalam Tinjauan Uji Model. *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim WAVE, Vol. 10(1)*, 25-30.
- Yulianto, T., & Ariesta, R. C. (2019). Analisis Kekuatan Shaft Propeller Kapal Rescue 40 Meter dengan Metode Elemen Hingga. *KAPAL: Jurnal Ilmu Pengetahuan & Teknologi Kelautan, Vol. 16(3)*, 100-105.
- Zhang, Y. M., He, X. D., Liu, Q. L., & Wen, B. C. (2005). Reliability-Based Optimization and Robust Design of a Coil Tube-Spring with Non-Normal Distribution Parameters. *Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 219(6)*, 567-575.

Halaman kosong