



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Kelelahan Propeler *KP-505 B-Series* dengan Variasi Jumlah Daun pada Kapal Kontainer 3600 TEUs

Rizki Aziz Radyantama¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Hartono Yudo^{1)*}

¹⁾Laboratorium Perencanaan Kapal dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, S.H., Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail: rizki.azizr@yahoo.com, ahmadfzakki@yahoo.com, hartono.yudo@yahoo.com

Abstrak

Transportasi laut membutuhkan sistem penggerak. Bentuknya pun bermacam-macam: layar, paddle wheel, water jet, hingga yang paling umum ialah baling-baling atau biasa dikenal dengan propeler. Pada proses pembuatannya, salah satu aspek yang perlu diperhatikan adalah kekuatan dan umur kelelahannya. Penelitian ini membandingkan gaya dorong dan torsi, serta umur kelelahan propeler *KP-505 B-Series* dengan variasi jumlah daun sebanyak 3 daun, 4 daun, dan 5 daun. Serta variasi masa pelayaran 150 hari, 200 hari, dan 300 hari. Analisis dilakukan dengan software berbasis CFD. Hasil pada penelitian ini menunjukkan perbedaan nilai thrust dan torsi pada masing-masing variasi, dimana hasil optimal terdapat pada variasi 5 daun dengan nilai thrust sebesar 81,16 N, dan torsi 2,92 N.m. Kemudian, untuk umur kelelahan terpendek, terdapat pada variasi propeler dengan 3 daun dan masa pelayaran 300 hari, dimana stress yang terjadi sebesar 3,85 MPa dengan masa pakai selama 8,70 tahun saja.

Kata Kunci : Propeler, *KP-505*, Fatigue Life, Metode Elemen Hingga

1. PENDAHULUAN

Setiap transportasi laut membutuhkan sistem penggerak. Bentuknya pun bermacam-macam: layar, *paddle wheel*, *water jet*, hingga yang paling umum ialah baling-baling atau biasa dikenal dengan propeler.[1] Sistem penggerak kapal ini lalu digolongkan menjadi dua, alat gerak non-mekanik dan mekanik.[2] Adapun komponen-komponen yang bekerja pada sebuah propeler adalah tekanan hidrostatis, gaya dorong pada tiap-tiap daun, gaya torsi pada masing-masing daun, serta gaya sentrifugal.[4]

Dalam pembuatannya, propeler merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan, dari mulai fungsi, bentuk, ukuran, jumlah daun, hingga strukturnya seperti kekuatan dan kelelahannya. Sebuah material apabila diberikan beban ataupun bekerja secara kontinyu, maka material tersebut akan sampai pada titik leleh dan bisa mengganggu kinerja saat digunakan.[2] Kenyataannya, umur kelelahan bersiklus tinggi adalah aspek dari

mekanika bahan dan struktur yang sangat berbahaya karena sifatnya progresif. [3]

Berbagai penelitian mengenai propeler telah dilakukan sebelumnya, khususnya mengetahui karakteristik dan struktur dari propeler yang akan digunakan. Muhammad Ridho[4] dalam penelitiannya terhadap propeler kapal ikan menyebutkan bahwa tegangan tertinggi atau *hotspot* terletak pada bagian *root* bagian belakang setiap daun propeler. Adapun tegangan tersebut memiliki nilai sebesar 133,6 MPa. Hasil yang sama juga didapat oleh Hilman[5] dalam penelitiannya yang menyatakan bahwa tegangan terbesar atau *hotspot* terletak pada bagian *root* bagian belakang propeler, dengan tegangan sebesar $3,515 \times 10^{11}$ Pa.[5] Metode-metode yang dilakukan untuk meneliti permasalahan ini pun bermacam-macam, salah satunya ialah metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD ialah salah satu metode yang bercabang dari mekanika fluida, yang

memiliki fungsi dalam menganalisis suatu benda yang memiliki keterkaitan dengan fluida.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kelelahan propeler KP-505 *B-Series* dengan variasi jumlah daun sebanyak 3, 4, dan 5 buah, serta mencari tahu propeler dengan umur paling baik dengan variasi jumlah daun tersebut.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui analisis umur kelelahan pada propeler KP-505 *B-Series* dengan variasi jumlah *blade* sejumlah 3,4, dan 5 buah. Kecepatan (V_s) yang digunakan sebesar 2 m/s, serta putaran propeler sebesar 11,429 RPS. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Perencanaan Kapal dibantu Komputer, Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

Penelitian ini menggunakan metode CFD untuk mencari *thrust* dan *torsi* pada masing-masing variasi propeler. Kemudian, *Finite Element Method* (FEM) digunakan untuk mencari umur kelelahan propeler. Kedua metode tersebut digunakan dalam penelitian ini karena memiliki beberapa kelebihan, salah satunya ialah mampu menganalisis sebuah model hingga detail elemen terkecil yang mampu dilakukan oleh komputer, dan juga meminimalisir kesalahan yang dapat menimbulkan kerugian materiil yang tinggi jika dibandingkan dengan eksperimen secara langsung. Adapun faktor dari kavitasi diabaikan pada penelitian ini, karena dapat memberikan pengaruh kompleks pada beban yang diterima propeler. [6]

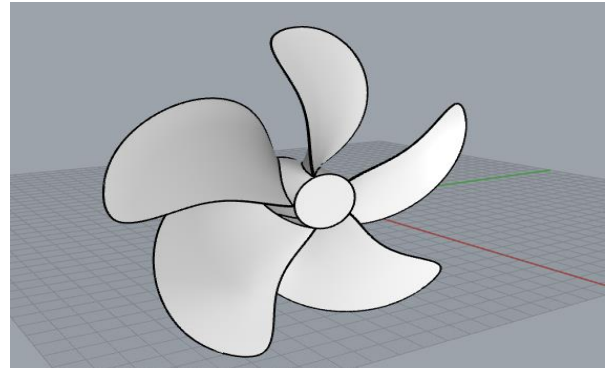
2.1. Geometri Propeler

Propeler yang digunakan berjenis KP-505 *B-Series* dengan spesifikasi sebagai berikut:

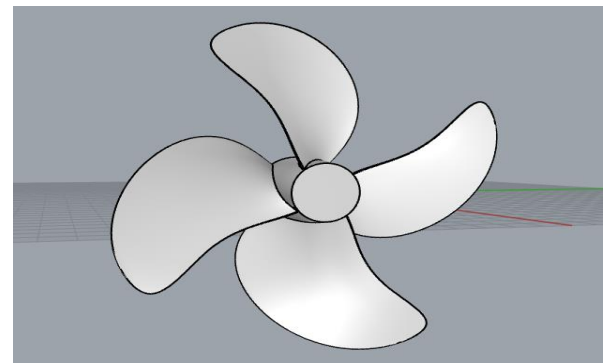
Tabel 1. Ukuran Utama Propeler

No	Spesifikasi	Dimensi
1	Jumlah daun	5 buah
2	Tipe	<i>B-Series</i>
3	Diameter	7,9 meter
4	<i>P/D ratio</i>	0,99
5	<i>Rake angle</i>	0 derajat
6	<i>Skew angle</i>	32 derajat
7	Arah putar	<i>Clockwise</i>
8	Material	<i>Aluminium</i>
9	<i>Hub ratio</i>	0,18
10	<i>Propeller type</i>	FPP
11	<i>Section</i>	NACA66
12	<i>Blade Area Ratio</i>	0,8002

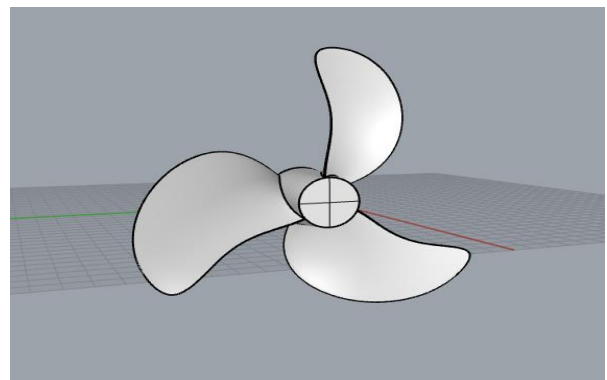
Adapun untuk keperluan penelitian, propeler ini kami skala sebesar 1:31,6 menjadi lebih kecil sehingga memiliki diameter selebar 250 mm. Tujuan kami memperkecil propeler ini supaya memudahkan penelitian terutama pada saat *running* di software yang digunakan.



Gambar 1. Propeler variasi 5 daun KP-505



Gambar 2. Propeler variasi 4 daun KP-505

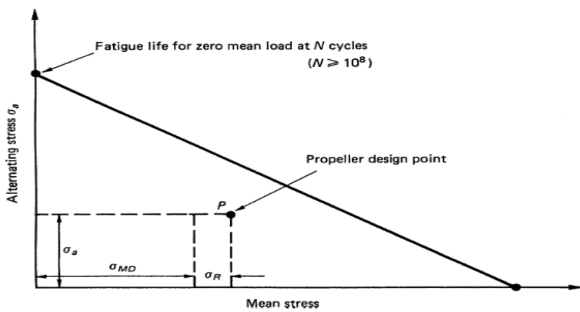


Gambar 3. Propeler variasi 3 daun KP-505

Propeler tersebut kami analisis dengan menggunakan kecepatan 2 m/s dan 11,429 RPS.[7] Adapun pada penelitian ini kami tidak menganalisis hubungan atau interaksi antara propeler dengan badan kapal, serta kavitasi juga tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini.

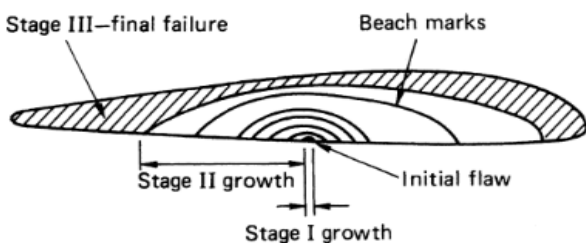
2.2. Karakteristik Kelelahan Propeler

Dalam pembuatan sebuah propeler harus disertai dengan analisis kelelahan dari propeler tersebut. Dalam rangka untuk menghubungkan tekanan *blade*, baik *steady state* dan fluktuasinya, beberapa bentuk dari analisis kelelahan berperan cukup penting. Adapun umur kelelahan suatu propeler harus mencapai 10^8 atau lebih besar.[8] Grafik analisa kelelahan pada suatu propeler ditunjukkan pada gambar dibawah:



Gambar 4. Grafik siklus umur kelelahan propeler

Dalam analisis kelelahan propeler, aplikasi *Computer Aided Engineering* (CAE) akan menampilkan gambar dengan penjelasan kontur dimana bagian elemen tersebut mengalami kelelahan awal pada Tahap I, kemudian bertumbuh dan merambat ke Tahap 2, hingga kondisi paling kritis Tahap 3 seperti contoh pada gambar dibawah ini:[8]



Gambar 5. Kontur siklus umur kelelahan propeler

Perhitungan kelelahan propeler pada umumnya menggunakan metode *first-order fatigue cycle* yaitu tegangan yang diterima oleh baling-baling selama 1 putaran.[4] Perhitungan *first-order fatigue cycle* dituliskan dalam rumus:[5]

First -order Fatigue Cycle =

$$\text{RPM} \times 60 \text{ minutes} \times 24 \text{ hours} \times \text{operating days in a year.} \quad (1)$$

Adapun perhitungan umur propeler pada umumnya menggunakan aturan Palmgren-Miner

yang telah dimodifikasi oleh Haibach.[9] Dimana aturan tersebut dinotasikan dengan:

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq \eta \quad (2)$$

Dimana:

n_i = jumlah siklus hasil analisis

N_i = asumsi jumlah siklus yang direncanakan untuk 25 tahun.[10]

2.3 Pemodelan Propeler

Data dari propeler ini kami dapatkan dari *National Maritime Research Institute*, Jepang. Dari data propeler tersebut, kami variasikan menjadi 3, 4, dan 5 propeler. Propeler ini kami modelkan dengan *software Rhinoceros*.

2.4 Analisis Thrust dan Torsi

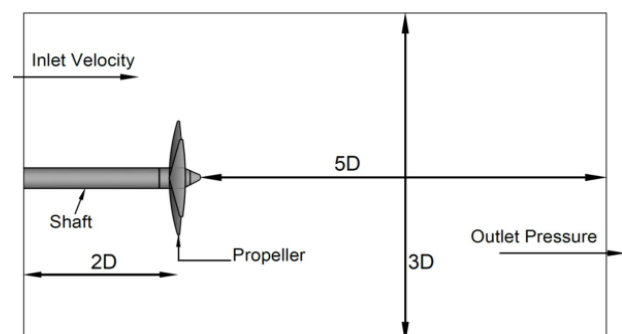
Pada dasarnya, analisis CFD menggunakan 3 tahapan, yaitu:

- *Pre Processor*
- *Solver/Processor*
- *Post Processor*

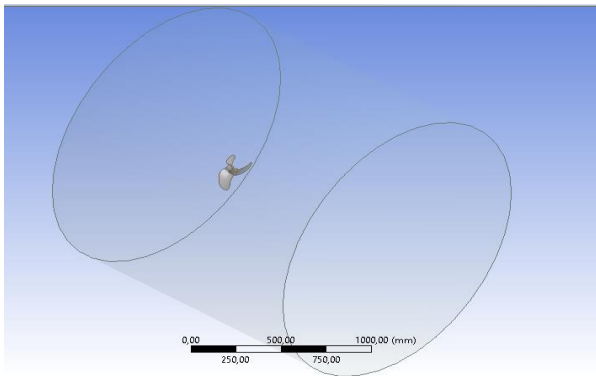
Tahap simulasi pada *ANSYS 18.0* pada dasarnya sama seperti *software* lain yang berbasis *Computational Fluid Dynamic*. Penelitian ini menggunakan *software Ansys CFX*. Umumnya langkah – langkah simulasi numerik ini dibagi menjadi beberapa tahapan antara lain:

- *Geometry*
- *Mesh*
- *Setup*
- *Solution*
- *Result*

Proses pertama pada analisis, kita memasukkan model yang telah dibuat sebelumnya, dan membuat batas-batas untuk media analisis. Berikut adalah dimensi batas yang akan digunakan:



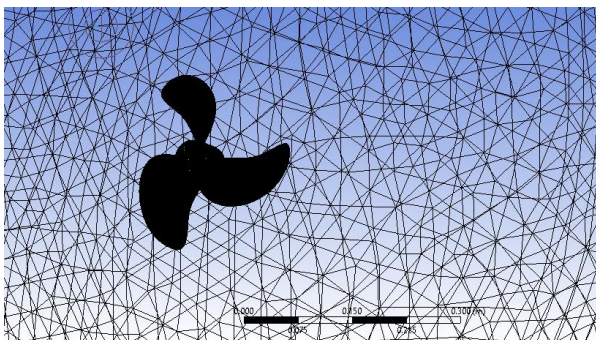
Gambar 6. Dimensi batas



Gambar 7. *Boundary condition* pada analisis CFD

Dimensi dari *boundary* ini kami dapatkan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Parra, Carlos. [11]

Setelah itu, perlu dilakukan proses *meshing*. Tujuan *meshing* adalah untuk membagi geometri tersebut menjadi lebih kecil, sehingga analisis yang dilakukan lebih akurat. Semakin kecil elemen, maka semakin akurat hasil analisisnya. Namun, proses yang dilakukan pun semakin lama.



Gambar 8. *Meshing* geometri

Tabel 2. Jumlah elemen hasil *mesh*

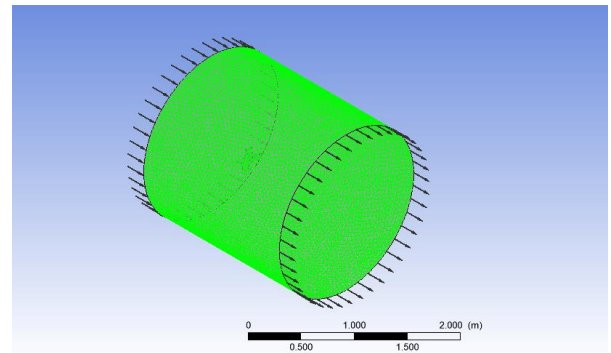
Variasi	Nodes	Elements	Min.	Max.
			Size (m)	Size (m)
3 daun	617.568	$3,2 \times 10^6$	$4,57 \times 10^{-4}$	$4,57 \times 10^{-2}$
4 daun	667.061	$3,4 \times 10^6$	$4,49 \times 10^{-4}$	$4,49 \times 10^{-2}$
5 daun	828.035	$4,2 \times 10^6$	$4,51 \times 10^{-4}$	$5,00 \times 10^{-2}$

Pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa jumlah *nodes* dan *elements* semakin bertambah pada setiap penambahan daun. Apabila *mesh quality* ditingkatkan, maka akan menghasilkan kerapatan yang lebih kecil dan meningkatkan keakuratan hasil. Namun, proses simulasi juga akan bertambah lama.

Tahap selanjutnya adalah pengaturan *domain* atau *set-up*. Pada tahap ini, geometri-geometri tersebut perlu dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall*, dan propeler.

Tabel 3. *Set-up default domain*

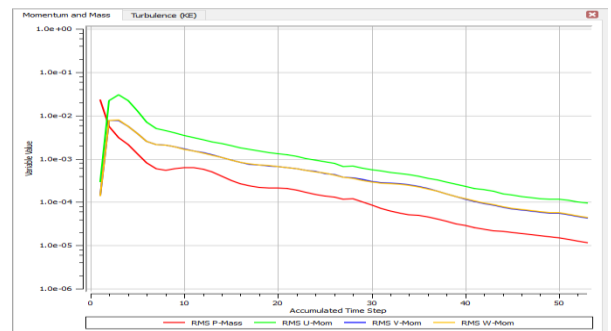
Domain - Default Domain			
Type	Fluid		
Location	3 daun	4 daun	5 daun
	B54	B65	B197
Materials	Solid		
Fluid Definition	Material Library		
Morphology	Continuous Solid		
Settings			
Buoyancy Model	Non Buoyant		
Domain Motion	Rotating		
Angular Velocity	-11.429 [rev s ⁻¹]		
Axis Definition	Coordinate Axis		
Rotation Axis	Global X		
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]		
Heat Transfer Model	None		
Turbulence Model	k epsilon		
Turbulent Wall	Scalable		



Gambar 9. *Set-up* kondisi batas

Pada tahap *set-up* juga kita tentukan pengaturan *solver*. Pada jumlah iterasi, kita bisa perbanyak supaya semakin detail dan akurat hasil analisisnya. Selain itu, tingkat konvergensi juga perlu diperkecil supaya menambahkan tingkat ketelitian. Adapun tingkat konvergensi yang digunakan senilai 1×10^{-4} .

Tahap berikutnya ialah proses *solver*. Proses ini cukup memakan waktu lama karena *software* yang digunakan perlu memecahkan perhitungan matematis CFD dari sesuatu yang kita analisis.



Gambar 10. Grafik iterasi

Proses iterasi merupakan tahap terakhir dari analisis CFD. Proses iterasi dapat dikatakan

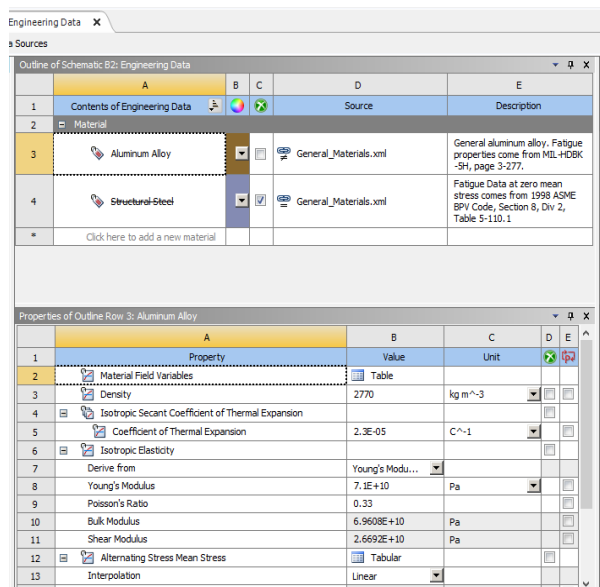
konvergen apabila proses tersebut berhenti secara otomatis dan tidak mengalami *error*. Apabila tahap iterasi seperti pada Gambar 10 mengalami *error*, maka hasil tidak dapat muncul.

Tahap selanjutnya dari proses analisis CFD ialah melihat hasil dari iterasi tersebut. Dari proses ini, kita bisa melihat hasil *thrust*, *torsi*, *pressure*, aliran, dan sebagainya. Apabila hasil yang ditampilkan tidak sesuai harapan, maka kita bisa mengatur ulang proses *set-up* dan iterasi dari awal.

2.5 Analisis Kelelahan Propeler

Setelah kita mendapatkan hasil *thrust* dan *torsi*, langkah berikutnya ialah kita mencari tingkat kelelahan dari propeler tersebut. Pada analisis kali ini, yang digunakan adalah *Ansys Static Structural*.

Tahap pertama adalah pendefinisian material yang digunakan pada fitur *Engineering Data*. Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah aluminium.

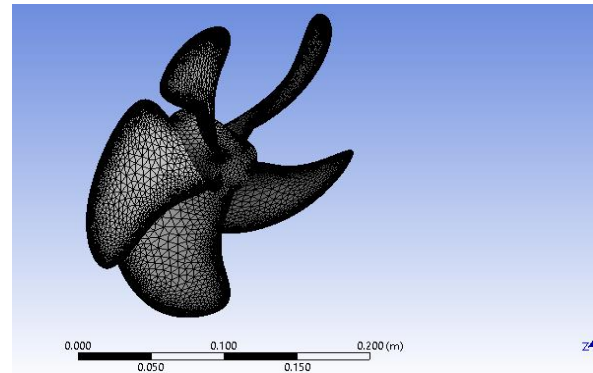


Gambar 11. *Engineering Data*

Selanjutnya, ialah kita mengatur model yang digunakan. Pada *Static Structural*, kita tidak memerlukan *boundary* yang sebelumnya digunakan pada analisis CFD. Untuk itu, perlu dilakukan tahap *suppress* pada *boundary* tersebut. Setelah itu, *mesh* perlu dilakukan lagi pada masing-masing propeler. *Setting* pada *mesh* dapat kita lihat pada Tabel 4.

Tabel 4. *Set-up mesh*

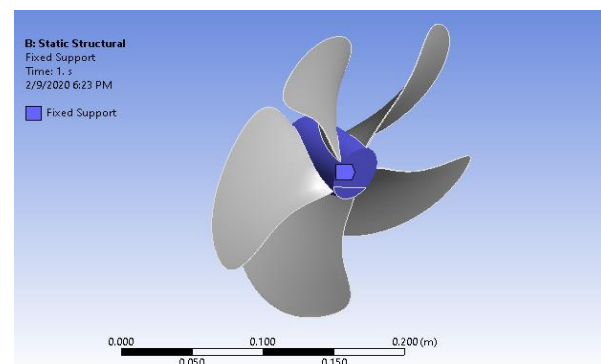
<i>Details of Mesh</i>	
<i>Physics Preference</i>	<i>Mechanical</i>
<i>Sizing</i>	
<i>Size Function</i>	<i>Curvature</i>
<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
<i>Transition</i>	<i>Slow</i>
<i>Span Angle Center</i>	<i>Fine</i>



Gambar 12. *Mechanical mesh* propeler KP-505

Pada tahap *mesh* di *Static Structural*, *mesh* yang digunakan berupa *setting* yang sama seperti *setting* di CFX seperti pada Gambar 12. Semakin tinggi kerapatan *mesh*, maka semakin baik hasilnya.

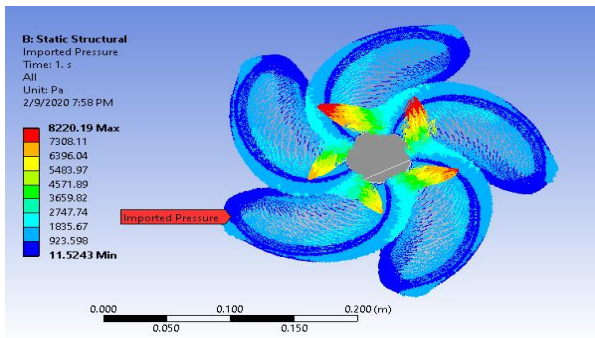
Setelah melakukan *mesh*, selanjutnya kita menentukan titik *fixed support* atau tumpuan pada propeler, dalam hal ini adalah *hub* dari propeler tersebut seperti pada Gambar 13. Hal ini dilakukan supaya *hub* tersebut tidak diperhitungkan tingkat kelelahannya.



Gambar 13. Penentuan titik tumpu pembebanan

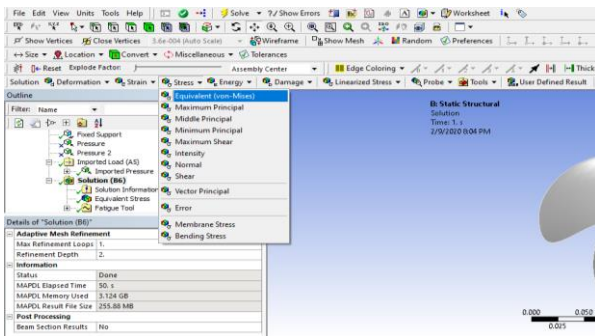
Berikutnya adalah tahap *importing pressure* seperti pada Gambar 14. Hal yang dilakukan ialah membuka *model trees* dan klik *imported load*. Kemudian *Import* dan klik *Solve* yang berlogo petir. Tahap ini memerlukan waktu yang cukup lama. Hal ini terjadi karena *Ansys* perlu memetakan

pressure dari analisis sebelumnya dengan detail pada tiap-tiap elemen.



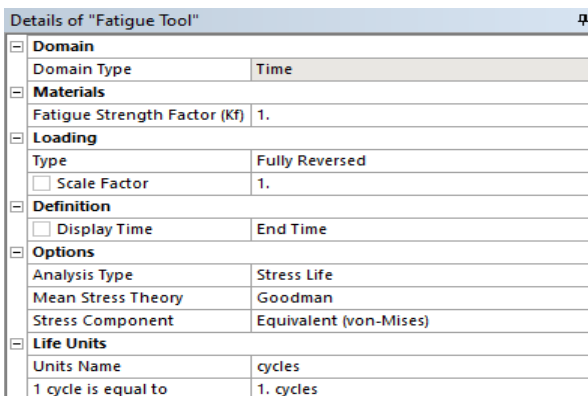
Gambar 14. Imported pressure dari analisis CFD

Setelah itu, kita perlu mencari *Equivalent Stress* pada propeler. Hal ini dilakukan supaya propeler yang ingin kita analisis bisa menunjukkan tingkat kelelahannya, juga *life-cycles* dari propeler tersebut. Seperti pada Gambar 15, *Equivalent Stress* dapat kita atur dengan cara klik *Solution > Stress > Equivalent Stress (von-Mises) > Solve*.



Gambar 15. Fitur *Equivalent stress (von Mises)*

Tahap terakhir pada analisis umur kelelahan propeler yaitu mendefinisikan *life-cycles* pada masing-masing propeler. Dari tahap ini, kita akan mengetahui berapa lama propeler tersebut akan bertahan dengan kondisi pemakaian rutin tanpa ada perbaikan pada propeler tersebut. Langkah-langkah yang dilakukan adalah *Solution > Tools > Fatigue Tool > Contour Result > Life > Solve*, seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. *Setting Fatigue Tool*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah terakhir dari penelitian yang telah dilakukan adalah validasi dari hasil-hasil yang telah didapatkan. Pada analisis CFD, validasi yang digunakan adalah kurva *KT-KQ-J Wangeningen B-Series*.

3.1. Validasi *KT-KQ-J Propeler*

Dari hasil analisis dengan *software Ansys CFX*, kita mendapatkan hasil berupa *thrust* dan *torsi*.

Tabel 5. Hasil perhitungan *thrust* dan torsi

Jumlah Daun	<i>Thrust</i> (N)	<i>Torsi</i> (N m)
3 daun	68,55	2,35
4 daun	73,26	2,71
5 daun	81,16	2,92

Pada Tabel 5, dapat dilihat bahwa nilai *thrust* dan torsi akan bertambah secara linear dengan jumlah daun, dan nilai *thrust* untuk masing-masing variasi propeler adalah sebesar 68,55 N untuk variasi 3 daun, 73,25 N untuk variasi 4 daun, dan 81,17 N untuk variasi 5 daun. Sedangkan untuk nilai *torsi* adalah sebesar 2,35 N.m untuk variasi 3 daun, 2,72 N.m untuk variasi 4 daun, dan 2,82 N.m untuk variasi 5 daun.

Hasil pada Tabel 5 perlu divalidasi dengan cara sebagai berikut:

$$J = \frac{Va}{n \times D} \quad (3)$$

$$KT = \frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4} \quad (4)$$

$$KQ = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5} \quad (5)$$

Dimana:

- *KT* = Koefisien gaya dorong propeler
- *KQ* = Koefisien torsi propeler
- *J* = Koefisien *advanced* propeler
- *C_T* = Koefisien beban gaya dorong
- *Va* = Kecepatan *advanced*, ft/s
- *D* = Diameter propeler, ft
- *N* = Putaran propeler, rev/s
- *T* = *Thrust* propeler, lbf
- *Q* = *Torsi* propeler, lbf ft
- ρ = *Fluid density*, 1,9905 s/ft³

Tabel 6. Geometri propeler KP-505

Diameter	= 250 mm	= 0,82 ft
Kecepatan Putaran	= 11,429 rps	= 685,56 rpm
Va	= 2 m/s	= 6,56 ft/s
Massa jenis	= 1,9905 s/ft ³	
P/D	= 0,99	
AE/AO	= 0,5 (3 daun); 0,65 (4 daun); 0,8 (5 daun)	

Tabel 7. Validasi *thrust* propeler KP-505

Variasi Daun	Hasil Analisis CFD	Hasil Perhitungan	Persentase Error
3 Daun	68,55 N	71,63 N	4,29%
4 Daun	73,25 N	77,03 N	4,91%
5 Daun	81,17 N	82,31 N	1,39%

Tabel 8. Validasi torsi propeler KP-505

Variasi Daun	Hasil Analisis CFD	Hasil Perhitungan	Persentase Error
3 Daun	2,35 N.m	2,27 N.m	3,24%
4 Daun	2,72 N.m	2,61 N.m	4,18%
5 Daun	2,92 N.m	2,82 N.m	1,39%

Berdasarkan hasil validasi pada Tabel 7 dan Tabel 8, dapat dibuktikan bahwa perhitungan *thrust* dan torsi dikatakan valid. Karena *error* yang terjadi masih berada dibawah 5%. [13]

3.2. Hasil Analisis *Equivalent Stress (von Mises)*

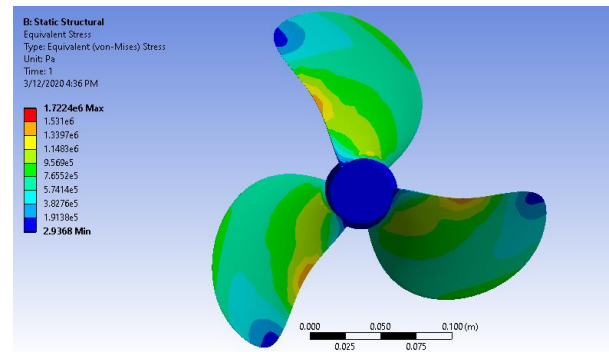
Setelah perhitungan *thrust* dan *torsi* selesai dan dapat dikatakan valid, langkah berikutnya adalah mengolah data yang telah didapat dari hasil simulasi *Static Structural*. Pada simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil *Equivalent Stress (von Mises)*

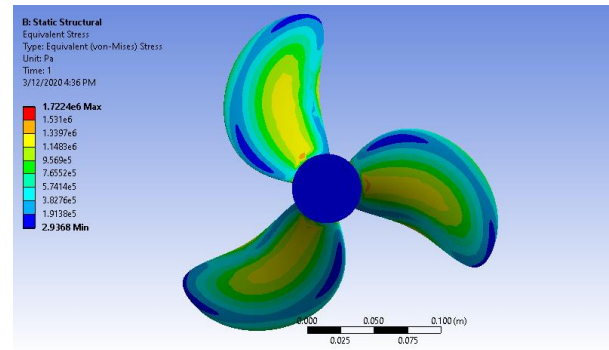
Variasi Daun	<i>Equivalent Stress</i>	
	Minimal [Pa]	Maksimal [Pa]
3 Daun	11,67	3,85 x 10 ⁶
4 Daun	31	1,19 x 10 ⁶
5 Daun	0	8,19 x 10 ⁵

Pada Gambar 17 hingga Gambar 22, dapat dilihat bahwa *hotspot stress* terletak pada bagian *suction root* bagian belakang propeler, baik pada variasi 3 daun, 4 daun, maupun 5 daun.

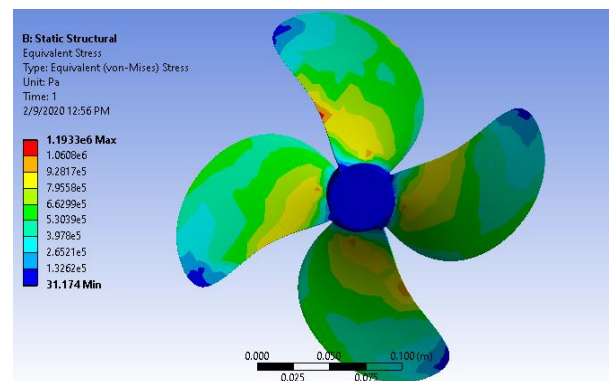
Tingkat *stress* maksimal akan berkurang seiring dengan bertambahnya jumlah daun. Adapun untuk 3 daun mengalami *stress* maksimal sebesar 3,85 x 10⁶ Pa, untuk 4 daun sebesar 1,19 x 10⁶ Pa, dan untuk 5 daun sebesar 8,19 x 10⁵ Pa.



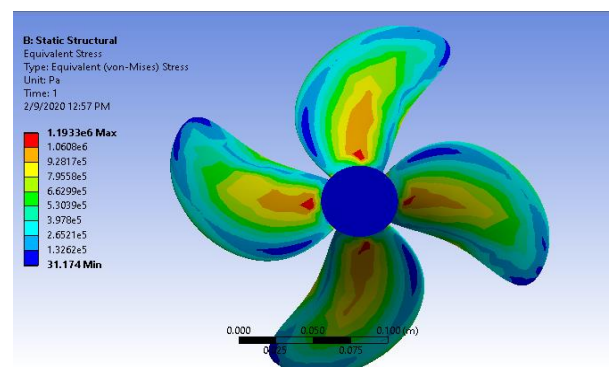
Gambar 17. *Equivalent Stress* Propeler 3 Daun Tampak Depan



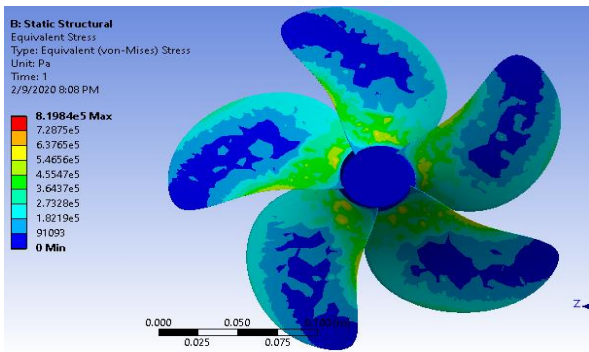
Gambar 18. *Equivalent Stress* Propeler 3 Daun Tampak Belakang



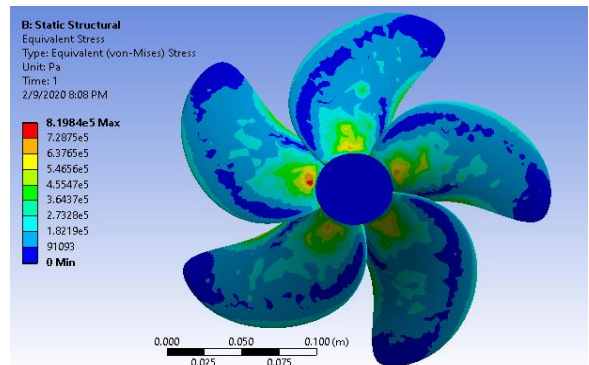
Gambar 19. *Equivalent Stress* Propeler 4 Daun Tampak Depan



Gambar 20. *Equivalent Stress* Propeler 4 Daun Tampak Belakang



Gambar 21. *Equivalent Stress* Propeler 5 Daun Tampak Depan



Gambar 22. *Equivalent Stress* Propeler 5 Daun Tampak Belakang

3.3 Hasil Analisis *Fatigue Life*

Setelah didapatkan hasil *Equivalent Stress* (*von Mises*), langkah selanjutnya adalah menghitung *life cycles* dari masing-masing propeler. Hal pertama yang perlu dilakukan ialah menghitung *first-order fatigue cycle* pada masing-masing propeler pada masa pelayaran 150, 200, dan 300 hari. Adapun variasi pelayaran ini digunakan sebagai asumsi awal supaya memudahkan para pemilik kapal untuk membantu menentukan masa pelayaran kapal mereka. Adapun perhitungannya dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{First-order Fatigue Cycle} =$$

$$\text{RPM} \times 60 \text{ minutes} \times 24 \text{ hours} \times \text{operating days in a year.}$$

Tabel 10. *Fatigue Life-Cycle* 150 Hari

Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycles Minimal (N_i)		
		3 Daun	4 Daun	5 Daun
1 Years	$1,48 \times 10^8$			
10 Years	$1,48 \times 10^9$	6,35	6,73	6,95
20 Years	$2,96 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$3,70 \times 10^9$			

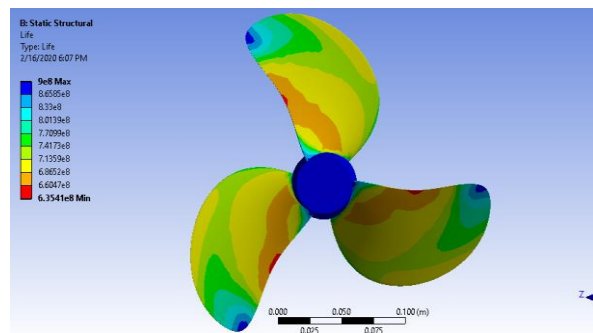
Tabel 11. *Fatigue Life-Cycle* 200 Hari

Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycles Minimal (N_i)		
		3 Daun	4 Daun	5 Daun
1 Years	$1,97 \times 10^8$			
10 Years	$1,97 \times 10^9$	6,35	6,73	6,95
20 Years	$3,95 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$4,94 \times 10^9$			

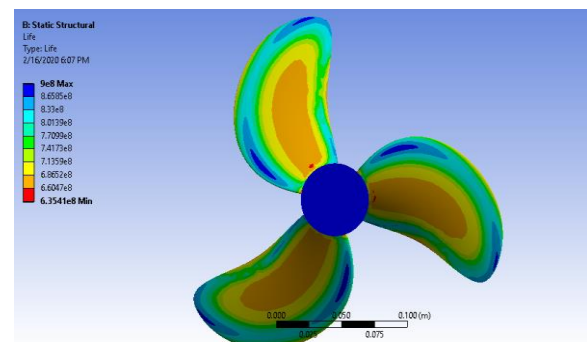
Tabel 12. *Fatigue Life-Cycle* 300 Hari

Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycles Minimal (N_i)		
		3 Daun	4 Daun	5 Daun
1 Years	$2,96 \times 10^8$			
10 Years	$2,96 \times 10^9$	6,35	6,73	6,95
20 Years	$5,92 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$7,40 \times 10^9$			

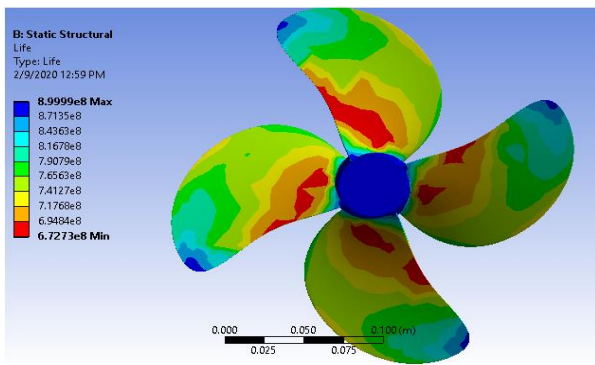
Pada Tabel 10 sampai Tabel 12, dapat dilihat bahwa tingkat *fatigue cycles* akan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu berlayar. Hal ini disebabkan propeler akan bekerja lebih lama, sehingga tingkat kelelahan pun otomatis meningkat.



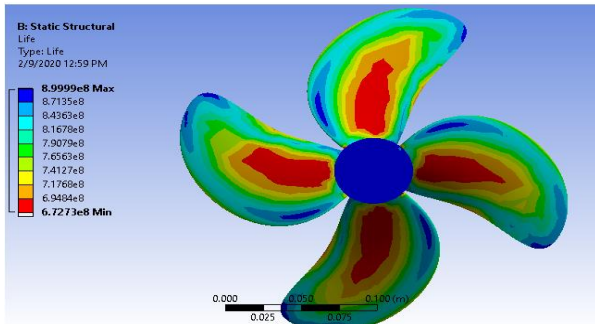
Gambar 23. *Fatigue life-cycle* pada propeler 3 Daun Bagian Depan



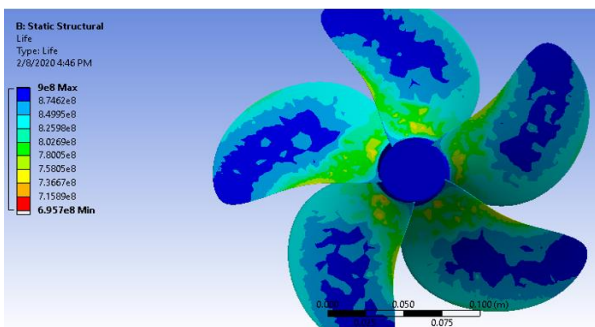
Gambar 24. *Fatigue life-cycle* pada propeler 3 Daun Bagian Belakang



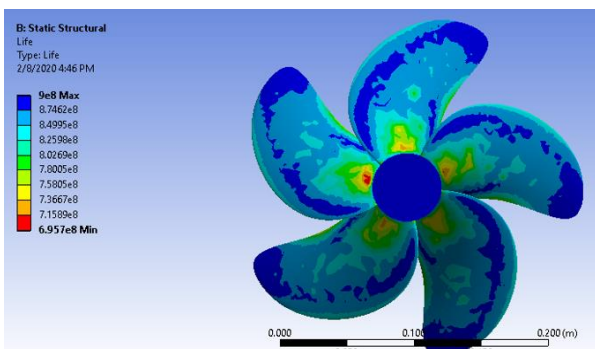
Gambar 25. *Fatigue life-cycle* pada propeler 4 Daun Bagian Depan



Gambar 26. *Fatigue life-cycle* pada propeler 4 Daun Bagian Belakang



Gambar 27. *Fatigue life-cycle* pada propeler 5 Daun Bagian Depan



Gambar 28. *Fatigue life-cycle* pada propeler 5 Daun Bagian Belakang

Pada Gambar 23 hingga Gambar 28, dapat dilihat bahwa siklus kelelahan paling rendah terletak pada *root suction* bagian belakang propeler, baik pada propeler 3 daun, 4 daun, maupun 5 daun. Selain itu, keseluruhan propeler menunjukkan tingkat siklus diatas 10^8 , yang

menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki tingkat elastisitas dan kelelahan yang cukup tinggi. [8] Hasil yang sama juga dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh R. Surendra, et.al.[12] yang juga menunjukkan tingkat *stress* terbesar terletak pada bagian *suction root* bagian belakang daun propeler.

Setelah kita mendapatkan keluaran analisis *life-cycles* dari hasil *running* di *Ansys Static Structural*, selanjutnya angka-angka tersebut kita hitung dengan menggunakan persamaan (2).

Adapun perhitungan usia propeler untuk waktu pelayaran selama 150 hari dalam setahun adalah sebagai berikut:

a. Perhitungan untuk variasi 3 daun dengan waktu pelayaran 150 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 3,70 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 9,12 \times 10^8$$

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

$$= \frac{9,12 \times 10^8}{6,35 \times 10^8} = 1,44$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,44} = 17,41 \text{ years}$$

b. Perhitungan untuk variasi 4 daun dengan waktu pelayaran 150 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 3,70 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 9,12 \times 10^8$$

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

$$= \frac{9,12 \times 10^8}{6,73 \times 10^8} = 1,36$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,36} = 18,45 \text{ years}$$

c. Perhitungan untuk variasi 5 daun dengan waktu pelayaran 150 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

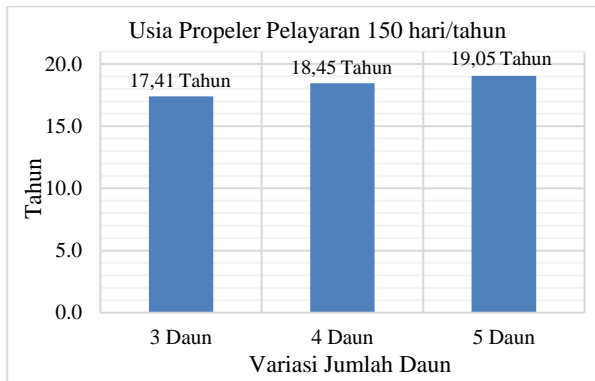
$$= \frac{0,85 \times 3,70 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 9,12 \times 10^8$$

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

$$= \frac{9,12 \times 10^8}{6,95 \times 10^8} = 1,31$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,31} = 19,05 \text{ years}$$



Gambar 29. Usia Propeler Pelayaran 150 Hari

Pada Gambar 29, dengan masa pakai selama 150 hari dalam setahun dan tanpa perbaikan rutin, atau dalam kata lain pada pemakaian dan pembebanan maksimal, umur propeler 3 daun sebesar 17,41 tahun, untuk 4 daun sebesar 18,45 tahun, dan untuk 5 daun sebesar 19,05 tahun.

Adapun selanjutnya ialah perhitungan untuk waktu pelayaran selama 200 hari dalam setahun:

d. Perhitungan untuk variasi 3 daun dengan waktu pelayaran 200 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 4,94 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,22 \times 10^9$$

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

$$= \frac{1,22 \times 10^9}{6,35 \times 10^8} = 1,92$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,92} = 13,05 \text{ years}$$

e. Perhitungan untuk variasi 4 daun dengan waktu pelayaran 200 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 4,94 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,22 \times 10^9$$

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

$$= \frac{1,22 \times 10^9}{6,73 \times 10^8} = 1,81$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,81} = 13,83 \text{ years}$$

f. Perhitungan untuk variasi 5 daun dengan waktu pelayaran 200 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

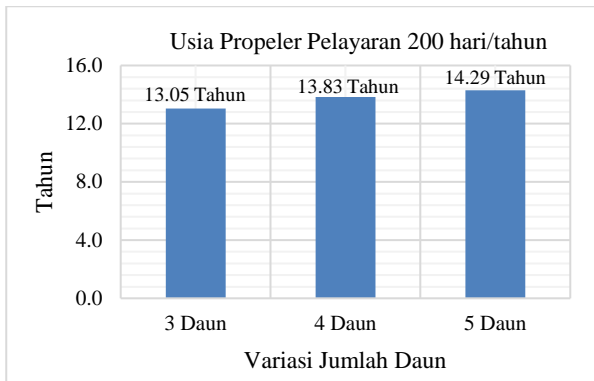
$$= \frac{0,85 \times 4,94 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,22 \times 10^8$$

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

$$= \frac{9,12 \times 10^8}{6,95 \times 10^8} = 1,75$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{1,31} = 14,29 \text{ years}$$



Gambar 30. Usia Propeler Pelayaran 200 Hari

Pada Gambar 30, untuk masa pakai selama 200 hari dalam setahun dan tanpa perbaikan rutin, atau dalam kata lain pada pemakaian dan pembebanan maksimal, umur propeler 3 daun sebesar 13,05 tahun, untuk 4 daun sebesar 13,83 tahun, dan untuk 5 daun sebesar 14,29 tahun.

Terakhir, dibawah ini ialah perhitungan untuk waktu pelayaran selama 300 hari dalam setahun:

g. Perhitungan untuk variasi 3 daun dengan waktu pelayaran 300 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 7,40 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,82 \times 10^9$$

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

$$= \frac{1,82 \times 10^9}{6,35 \times 10^8} = 2,87$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{2,87} = 8,70 \text{ years}$$

h. Perhitungan untuk variasi 4 daun dengan waktu pelayaran 300 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

$$= \frac{0,85 \times 7,40 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,82 \times 10^9$$

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

$$= \frac{1,82 \times 10^9}{6,73 \times 10^8} = 2,71$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

$$= \frac{25}{2,71} = 9,22 \text{ years}$$

i. Perhitungan untuk variasi 5 daun dengan waktu pelayaran 300 hari:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{fatigue cycles for 25 years}}{4 \log Lpp}$$

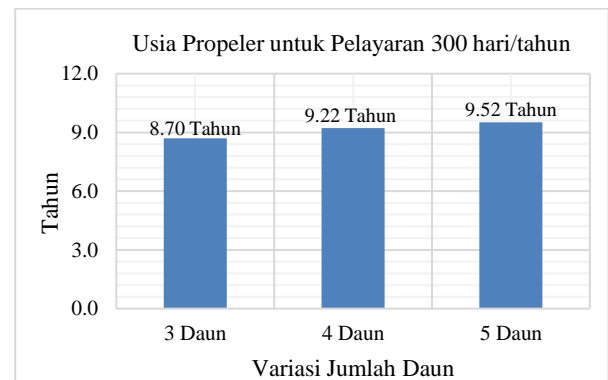
$$= \frac{0,85 \times 7,40 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 1,82 \times 10^9$$

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

$$= \frac{1,82 \times 10^9}{6,95 \times 10^8} = 2,62$$

$$\text{Propeller life} = \frac{\text{Design life (25 years)}}{D_m}$$

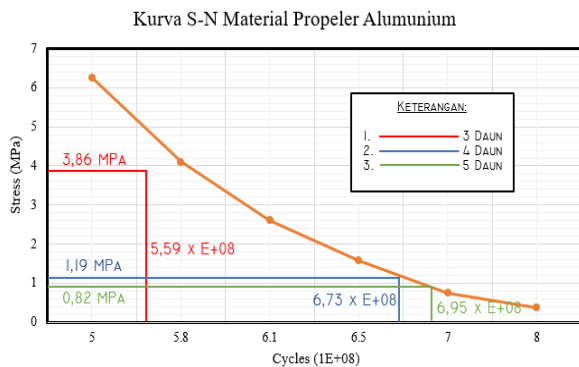
$$= \frac{25}{2,62} = 9,52 \text{ years}$$



Gambar 31. Usia Propeler Pelayaran 300 Hari

Sedangkan, pada Gambar 31, dengan masa pakai selama 300 hari dalam setahun dan tanpa perbaikan rutin, atau dalam kata lain pada pemakaian dan pembebanan maksimal, umur propeler 3 daun sebesar 8,70 tahun, untuk 4 daun sebesar 9,22 tahun, dan untuk 5 daun sebesar 9,52 tahun.

Berdasarkan hasil penelitian, Gambar 29 sampai Gambar 31, garis tren umur menunjukkan bahwa semakin tinggi *life-cycles* dari sebuah konstruksi, dalam hal ini propeler, maka akan memperpanjang umur pakai.



Gambar 32. Kurva S-N Propeler

Gambar 35 menunjukkan kurva S-N untuk propeler 5 daun memiliki siklus lebih tinggi dibandingkan dengan 3 daun maupun 4 daun.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan keseluruhan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan dimana tingkat *thrust* dan torsi meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah daun. Hal ini disebabkan oleh massa tiap variasi jumlah propeler akan bertambah seiring dengan pertambahan jumlah daun. Oleh karena itu, *thrust* dan torsi yang terbentuk pun akan semakin tinggi.

Sedangkan tegangan material propeler akan semakin berkurang jika jumlah daun bertambah, karena jumlah penampang tiap variasi jumlah daun pun bertambah, sehingga tegangan yang diterima akan terdistribusi secara merata pada setiap daun propeler. Hal ini sesuai dengan rumus dasar *stress* atau tegangan, yaitu:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

dimana:

σ = *stress* atau tegangan

F = *Force/thrust*

A = Area/luas bidang objek

Adapun usia pakai propeler lebih lama terdapat pada propeler KP-505 B-Series berjumlah 5 daun dengan masa pelayaran 150 hari. Sedangkan, masa pakai paling rendah pada propeler 3 daun dengan masa pakai 300 hari.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Manik, Parlindungan. 2018. *Buku Ajar Propulsi Kapal*. Semarang: LPPM Pendidikan Universitas Diponegoro.

[2] Abidin, M. Z., Adji, Surjo W., Arief, I. F. 2012. *Analisa Performance Propeller B-Series* dengan Pendekatan *Structure dan*

Unstructure Meshing. Jurnal Teknik ITS, 1(1), pp. G-241 - G-246.

[3] Ezanno, A., et.al. 2014. *Validation of a High-Cycle Fatigue Model via Calculation/Test Comparisons at Structural Scale: application to copper alloy sand-cast ship propellers*. International Journal of Fatigue Vol. (74) pp. 38-45.

[4] Ridho, Muhammad, Ahmad Fauzan Zakki, dan Parlindungan Manik. 2015. *Analisa Fatigue Propeller Tugboat Ari 400 HP dengan Metode Elemen Hingga*. Jurnal Teknik Perkapalan Vol. (3) No. 1, pp. 110 – 117.

[5] Salam, Hilman A. H. 2017. *Analisa Kelelahan Propeller Kapal Ikan PVC dengan Metode Elemen Hingga*. Jurnal Teknik Perkapalan Vol. (5) No. 1, pp. 243 – 252.

[6] Ortolani, F., et.al. *Experimental investigation of blade and propeller loads: Steady turning motion*. Applied Ocean Research Vol. (91) DOI: [10.1016/j.apor.2019.101874](https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101874)

[7] Berger, S., et. al. *Numerical Simulation of Propeller-Rudder Interaction for Non-Cavitating and Cavitating Flows Using Different Approaches*. Fourth International Symposium on Marine Propulsors. Texas: 31 Mei – 4 Juni 2015, pp. 408 – 419.

[8] Carlton, J.S. 2019. *Marine Propellers and Propulsion*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

[9] Schoenborn, S. 2015. *Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications*. Procedia Engineering Vol. (101) pp. 440-449.

[10] Biro Klasifikasi Indonesia. 2018. *Rules for Bulk Carrier and Oil Tanker*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.

[11] Carlos, Parra. 2013. *Numerical Investigation of the Hydrodynamic Performances of Marine Propeller* [Thesis]. Gdynia: University of Galati.

[12] Rao, R. S., et.al. 2016. *Determination of Fatigue Life of Surface Propeller by Using Finite Element Analysis*. International Journal of Engineering Science and Computing Vol. (6) pp. 2492-2503.

[13] Trimulyono, Andi. Kiryanto. 2015. *Analisa Efisiensi Propeller B-Series dan Kaplan pada Kapal Tugboat Ari 400 HP dengan Variasi Jumlah Daun, Sudut Rake Menggunakan CFD*. Jurnal Teknik Perkapalan, Vol. (12) No.2, pp. 112-120.