ANALISIS KELELAHAN NEW PROPELLER KAPLAN K4-70 SERIES PADA KAPAL TUGBOAT 1000 HP MENGGUNAKAN METODE COMPUTIONAL FLUID DYNAMICS

Muhammad Fauzan[1*], Adi Wirawan Husodo, S.T., M.T.[2], Benedicta Dian Alfanda, S.T., M.T.[1]

Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal, Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia[1]*
Program Studi D4 Teknik Perpipaan, Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia[1]*
Email: mfauzan@student.ppns.ac.id[1]; adiwirawan@ppns.ac.id; benedictadian@ppns.ac.id;*

Abstract- *The function of a tugboat is to tow or push other ships in harbors, open seas and rivers or canals. The propeller used should have an age according to the docking schedule, which is 5 years. However, the propeller was damaged before the ship docked. The owner ordered a new type of propeller with the Kaplan K4-70 series type. The loading given the results of the contour pressure on the CFD software is run using a variation of the propeller rotation. The FEM method for obtaining Hot Spot Stress uses the stress that occurs, namely the von Mises stress (equivalent stress). S-N curve to analyze the results of voltage values and cycles. After that, the value of the fatigue life of the propeller itself can be found. From the results of this study there is an influence on the thrust and torque values for each variation where from the running results the greatest value is obtained at 198.53 rpm at 18601.503 N and 3810.881 Nm and 234.24 rpm at 41563.213N and 6585.7302 Nm. The effect of variations in propeller rotation on thrust and torque values is that the greater the propeller rotation, the greater the value of thrust and torque as well. The location of the hot spot stress for each variation is at the root back blade of the propeller. The maximum stress/stress that occurs in the propeller is 198.53 rpm at 12.07 MPa, 238.24 rpm at 34.646 Mpa and for 357.35 rpm at 97.393. The effect of loading is that the greater the rpm/load value, the greater the resulting stress value (Von-Misses). The service life of the propeller is 198.53 rpm with a service life of 300 days for 25.865 years. For 238.24 rpm for 22.43 years and for 357.35 rpm for 14.57 years.*

Keyword: Kaplan K4-70 Series, CFD, FEM, Hotspot stress, Fatigue

Nomenclature

Z	*Jumlah daun propeller*
D	*Diameter propeller*
AE/AO	*Blade area ratio*
Vs	*Vessel speed*
RT	*Total resistance*
W	*Wake fraction*
t	*Thrust deduction*
Va	*Speed of advance*
J	*Advance coefficent*
KT	*Thrust coefficient*
KQ	*Torque coefficient*
Tprop	*Propeller thrust*
N	*Putaran propeller*
Design Life	*25 tahun*
DM	*cumulative fatigue damage:*
NL	*Total jumlah siklus*
Ni	*Jumlah siklus hasil analisa*
NL	*0,85TL/ 4log L*
TL	*Umur material 25 tahun*
L	*Lpp Kapal*

1. PENDAHULUAN

Kapal *tugboat* adalah kapal yang dapat digunakan untuk melakukan *maneuver* pergerakan, utamanya menarik atau mendorong kapal lainnya di pelabuhan, laut lepas atau melalui sungai atau terusan. Kapal Samarinda yang mengalami pergantian tipe *propeller* saat melakukan docking di galangan tersebut. Hal ini dikarenakan terdapat kondisi blade propeller yang lama mengalami pembengkokan, retak, dan patah pada area *propeller* ini. Pada pembengkokan diakibatkan dari gaya eksternal yang mengenai propeller ini. Untuk bagian yang retak serta yang patah terindikasi mengalami kelelahan propeller.

Jenis kegagalan yang dikarenakan waktu antara lain kelelahan, mulur, keausan dan korosi. Sedangkan jenis kegagalan quasi static yaitu kegagalan akibat beban Fatik, tekan dan geser[1]. Pada penilitan sebelumnya juga dibahas Analisa Kelelahan *Propeller* Kapal Ikan PVC Dengan Metode Elemen Hingga. Pada penelitian tersebut menggunakan tiga variasi saat proses load yaitu *hydrostatic pressure, force dan pressure*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan ansys *Static Structural* [2]. Selain itu juga membahas tentang Analisis Kelelahan *Propeler* KP-505 B-Series dengan Variasi Jumlah Daun pada Kapal Kontainer 3600 TEUs. Pada penelitian tersebut menggunakan variasi jumlah *blade*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah Pemodelan menggunakan metode *CFD* dan juga *ansys Static Structural* [3].

Pada penelitian ini akan dilakukan permodalan dengan metode simulasi *CFD*

(*Computational Fluid Dynamics*). Dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dapat memberikan gambaran untuk hasil yang di dapat dari suatu fluida dengan variasi yang ada. Sehingga dengan menggunakan metode tersebut dapat menganalisa aliran fluida pada propeller tersebut. Setelah dilakukan permodelan nantinya akan dilakukan validasi antara perhitungan manual dengan permodelan *CFD* untuk melihat nilai error pada hasil permodelan 3D. Setelah hasil validasi keluar juga dilakukan pemodelan menggunakan metode *FEM* untuk menghasilkan nilai tegangan yang natinya akan dibuat kurva S-N serta pembebanan untuk melihat nilai *fatigue life* atau umur kelelahan material propeller ini.

2. METODOLOGI.

2.1 Propeller

Propeller adalah alat penggerak kapal, salah satu bentuknya yang paling umum ialah baling-baling ulir [2]. Baling-baling ini memiliki daun yang berjumlah dua atau lebih dengan posisi yang menjorok dari hub atau boss. Karakteristik beban propeller dapat ditampilkan secara grafis dengan beberapa koefisien dalam bentuk pengukuran. Diagram open water menyatakan torsi dan thrust sebagai fungsi kecepatan propeller. Karakteristik propeller terdiri dari koefisien thrust (KT), koefisien torsi (KQ), dan advance coefficent (J).[4]

$$Kt = \frac{\mathrm{T}}{\rho.\mathrm{n}^2.\mathrm{D}^4} \quad (2.1)$$

$$Kq = \frac{\mathrm{Q}}{\rho.\mathrm{n}^2.\mathrm{D}^4} \quad (2.2)$$

$$J = \frac{Va}{n\ x\ D} \quad (2.3)$$

2.2 *CFD*

Computational fluid dynamics (*CFD*) adalah suatu metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida dan merupakan salah satu cabang dari penerapan mekanika fluida [5]. *CFD* ini bertujuan untuk memperkirakan secara tepat tentang aliran fluida, perpindahan panas, dan reaksi kimia dalam sistem yang kompleks, yang saling melibatkan baik satu maupun semua fenomena tersebut. Hal yang paling mendasar adalah mengapa konsep *CFD* (perangkat lunak *CFD*) banyak digunakan di dunia industri ini dengan analisis *CFD* dapat dilakukan suatu sistem dengan mereduksi biaya percobaan dan tentu saja waktu yang lama untuk percobaan[6]. Penelitian ini menggunakan software *CFD* sebagai analisa *CFD*. Computational Fluid Dynamics (*CFD*) terdiri dari tiga elemen utama:[5]

a) Pra Prosesor
b) Solver Manager
c) Post Processor

2.3 *Fatigue Life*

Sebuah beban yang dilakukan berulang – ulang dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan atau kegagalan, salah satunya ialah fatigue. Sekitar 90% dari kerusakan pada material yang paling sering sering terjadi disebabkan oleh kegagalan[7]. *First-order stress cycle* adalah tegangan yang diterima oleh baling-baling selama 1 putaran baling-baling. Jadi perhitungan first-order fatigue cycle pada material baling-baling adalah:[3]

First-order fatigue cycle = rpm x 60 minutes x 24 hours x operating days one year (2.4)

$$fatigue\ life = \frac{Design\ Life}{\mathrm{DM}} \quad (2.5)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Utama Kapal

Berikut merupakan data utama ukuran *propeller*:

a. Jenis *Propeller* : Ka4-70
b. Diameter *Propeller* : 1930 mm
c. *Pitch* : 1800 mm
d. *Pitch Rasio* : 0,93
e. *Blade* Area Rasio : 0,70
f. *Rake Angle* : 0
g. *Material* : Manganese Bronze

Berikut merupakan data utama kapal yang digunakan pada penelitian ini:

a. *Type of Ship* : TB. BIG FAIR 16
b. *Length over All (LOA)* : 27,20 m
c. *Breadth* : 8.20 m
d. *Depth* : 3.85
e. *Cb* : 0.72
f. *Vs* : 12 Kn

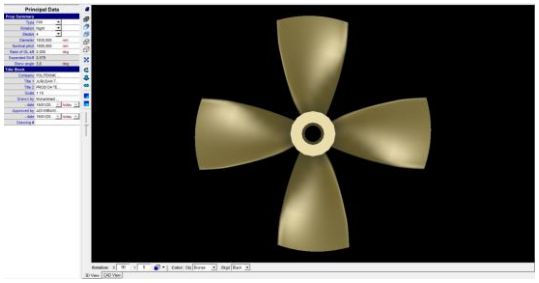
Berikut data spesifikasi *main engine* dan *gear box* yang digunakan pada penelitian ini:

a. Merk Mesin : Cummins KTA 38 M1
b. *RPM Engine* : 1800
c. *Ratio Gear box* : 5.037 : 1

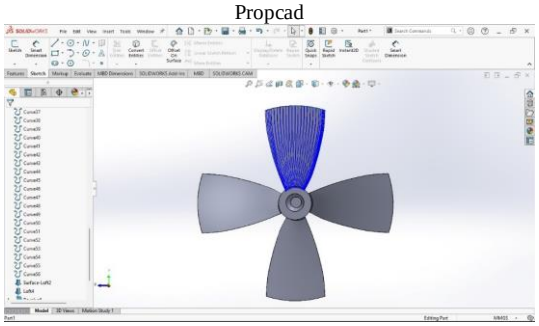
3.2 Analisa dan Pengolahan Data

3.2.1 Permodelan *Propeller*

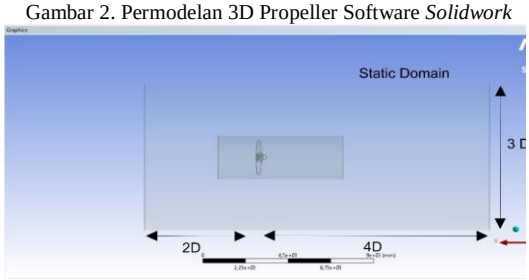
Hasil parameter optimal model propeller yang didapatkan maka selanjutnya adalah pembuatan model 3D. Pembuatan model ini dilakukan pada software PropCad dan kemudian dijadikan ke dalam bentuk solid pada software *Solidworks*. Penggambaran model dilakukan menggunakan *software propcad*. Gambar 1. adalah model 3d *propeller* dari *software propcad*.



Gambar 1. Permodelan 3D Propeller Menggunakan Software Propcad



Gambar 2. Permodelan 3D Propeller Software *Solidwork*



Gambar 3. *Domain Stasioner*

Hasil *import* geometri daun propeller dari propcad hanya berupa surfce dari blade propeller kita memerlukan *software* lagi. Import menuju software selanjutnya yaitu Solidwork. Gambar 2. adalah hasil import dari *software Propcad* yang akan di ubah menjadi bentuk solid model.

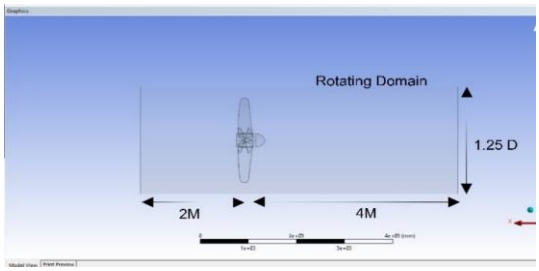
3.2.2 Simulasi *CFD*

Pada penelitian ini *software* yang digunakan untuk melakukan simulasi menggunakan *software CFD*. Simulasi ini dilakukan untuk melihat nilai dari *Thrust* dan *Torque* dari *propeller* yang telah di desain.

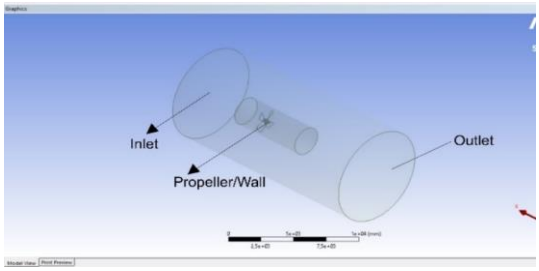
a. *Geometry*

Geometry adalah proses generate model *propeller* yang telah dibuat dan juga pembentukan *boundary condition*. *Boundary condition* yang dibuat akan dibagi menjadi 2 domain fluida[8]. Domain fluida yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 2 domain, yaitu domain *stationary* (diam) dan domain rotating (berputar). Gambar 3 merupakan domain *stationary* merupakan fluida yang mengalir menuju *propeller* dimana fluida ini mengalir secara statis sesuai dengan kecepatan aliran Va (*speed of advance*)

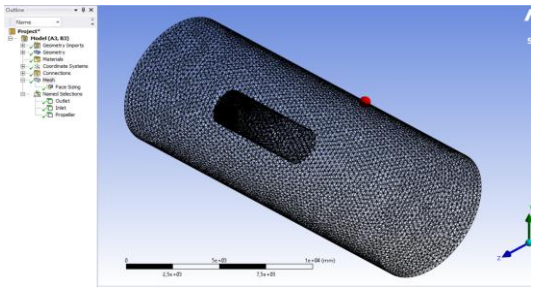
Gambar 5. merupakan hasil dari *boundary condition propeller*. Ukuran pada *boundary condition* mengacu pada ukuran pada penelitian yang ada [8].



Gambar 4. *Domain rotating*



Gambar 5. Hasil *Boundry Condition propeller*



Gambar 6. Hasil dari Proses *Meshing*

Table 1 Ukuran *Meshing*

Size	Nodes	Element
300 mm	58061	303044

Table 2 *Domain Static*

Nama Domain	***Domain_Static***
Location Domain	*ID [4]*
Domain Type	*Fluid Domain*
Solver	*Preasure Absolute*
Time	*Transient*
Presuare	1 Atm
Gravity	Y [-9,81 ms^-1]
Domain Motion	*Stationary*
Model	*K-Epsilon*
K-Epsilon Model	*Realizable*
Wall Function	*Scable*
Material	*Water Liquid*
Rotation Axis Direction	X [1]

Table 3 *Domain Rotating*

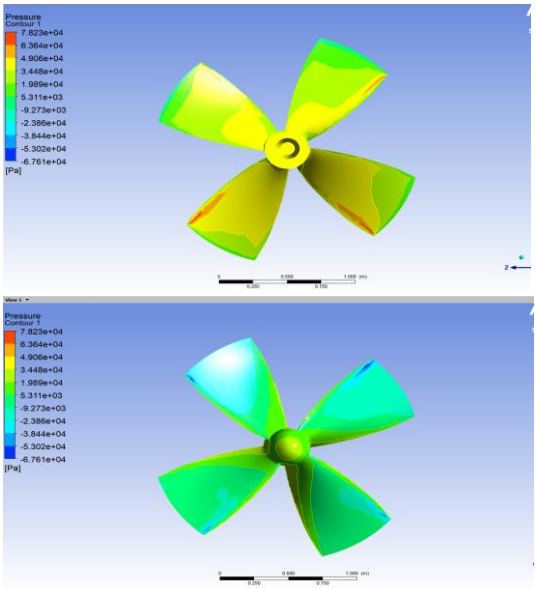
Nama Domain	***Domain_Rotating***
Location Domain	ID [5]
Domain Type	*Fluid Domain*
Solver	*Preasure Absolute*
Time	*Transient*
Presuare	1 Atm
Gravity	Y [-9,81 ms^-1]
Domain Motion	*Mesh Motion*
Model	*K-Epsilon*
K-Epsilon Model	*Realizable*
Wall Function	*Scable*
Material	*Water Liquid*
Rotation Axis Direction	X [1]
Rotational Velocity	198.53 [revmin^-1]
Relative Cell Zone	*Absolute*

Table 4 Inlet

Name Sub *Domain*	***Inlet***
Location	*Inlet*
Boundary Type	*Inlet*
Flow Regime	*Subsonic*
Mass and Momentum	*Normal Speed*
Normal Speed	4,136 [m s^-1}
Turbulance	*Medium (Intensity* = 5%)

Table 5 *Outlet*

Name Sub Domain	*Outlet*
Location	*Outlet*
Flow Regime	*Subsonic*
Mass and Momentum	*Static Pressure*
Normal Speed	*0 [pa]*



Gambar 7. *Face and Back Pressure*

thrust

Force	[N]
propeller	18601.503

torque

Moment	[N m]
propeller	-3810.881

Gambar 8. Hasil Uji *performance*

b. *Meshing*

Langkah selanjutnya setelah membuat Boundary Building ialah meshing. Gambar 6. merupakan hasil dari proses *meshing*. Hasil dari proses meshing yang telah dilakukan ialah berupa statistik ukuran serta jumlah node dan elemen serta ukuran meshing *sizing meshing* yang dihasilkan. Tabel 1. Untuk ukuran *meshing*, *nodes* dan *element*.

c. *Set Up*

Tahap selanjutnya ialah analisa *CFD* ini diperlukan melakukan setting kondisi batas/setup pada tiap-tiap *domain fluida* dimana pada menu setup ini akan ditentukan apakah aliran fluida bersifat *stationary* atau *rotating*.

Pada Tabel 2. merupakan *set up* untuk *domain static*. *Domain rotating* memiliki *set up* seperti Tabel 2. Tabel 3. *Domain* menunjukkan *set up* untuk *domain inlet* yang berfungsi sebagai aliran *fluida* masuk. *outlet* ditunjukkan pada tabel 5. sebagai aliran *fluida* keluar.

d. *Solution*

Tahap solution adalah tahap simulasi sesuai dengan *settingan* yang telah didefinisikan pada saat tahap setup. Pada proses solution ini dipilih running type *Type* dengan method User-Specified agar proses komputasi berjalan parallel sehingga proses simulasi tidak membutuhkan waktu yang lama.

e. *Result*

Tahap result adalah tahap terakhir untuk melihat hasil daripada simulasi. Hasil dari simulasi bisa dalam bentuk nilai thrust, torque. Gambar 7. hasil *Face* dan *Back pressure propeller* pada 198,53 rpm. Pada Gambar 8. adalah hasil uji *performance* pada 198,53 rpm.

3.2.3 Validasi *Propeller*

Validasi antara hasil dari simulasi uji performance model *propeller Kaplan series* yakni dengan menggunakan perhitungan manual. Perhitungan manual menggunakan acuan grafik KT-KQ-J diagram tipe Ka4 - 70. Maksimal *error* yang ditentukan adalah 5% [5].

a. Perhitungan *Thrust* dan *Torque*

- Perhitungan *Thrust*

$$T = KT \times \rho \times n^2 \times D^4$$

$$T = 0{,}115 \times 1025 \frac{kg}{m^3} \times (3{,}31)^2\, rps \times (1{,}93)^4 m$$

$$T = 17956{,}072\ N$$

- Perhitungan *Torque*

$$Q = KQ \times \rho \times n^2 \times D^5$$

$$Q = 0{,}023 \times 1025 \frac{kg}{m^3} \times (3{,}31)^2\, rps \times (1{,}93)^5 m$$

$$Q = 3652{,}251\ Nm$$

b. Perhitungan Error *Thrust* dan *Torque*

- *Error Thrust*

$$error\ Thrust = \frac{\text{T simulasi} - \text{T perhitungan}}{\text{T perhitungan}}\ x\ 100\%$$

$$= \frac{18601{,}503 - 17956{,}072}{17956{,}072} \times 100\%$$

= 3,59 %.

- *Error Torque*

$$error\ Torque = \frac{\text{T simulasi} - \text{T perhitungan}}{\text{T perhitungan}}\ x\ 100\%$$

$$= \frac{3810{,}881 - 3652{,}25}{3652{,}25} \times 100\%$$

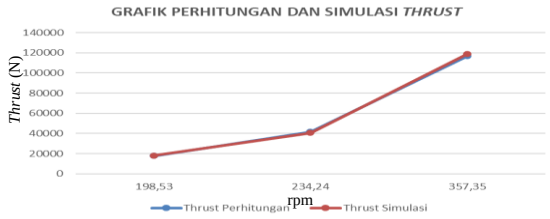
= 4,343 %

Table 6. Perhitungan error thrust pada variasi rpm

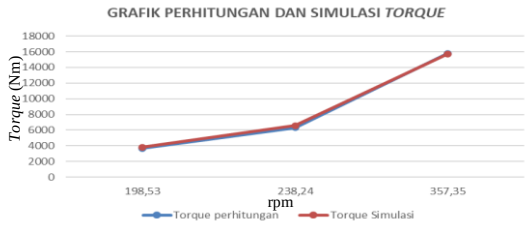
Jenis Propeller	rpm	*Thrust Perhitungan*	*Thrust Simulasi*	*error*
K4-70	198,53	17956,07	18601,50	3.59 %
K4-70	234,54	41536,213	40690,96	2,08 %
K4-70	357,35	116788,20	118671,8	1,61 %

Table 7. Perhitungan error *torque* pada variasi rpm

Jenis Propeller	rpm	*Torque Perhitungan*	*Torque Simulasi*	*error*
K4-70	198,53	3652,25	3810,881	4,34 %
K4-70	234,54	6312,17	6582,73	4,33 %
K4-70	234,54	15789,70	15740,76	0,31 %



Gambar 9. Grafik Perhitungan dan Simulasi *Thrust*



Gambar 10. Grafik Perhitungan dan Simulasi *Torque*

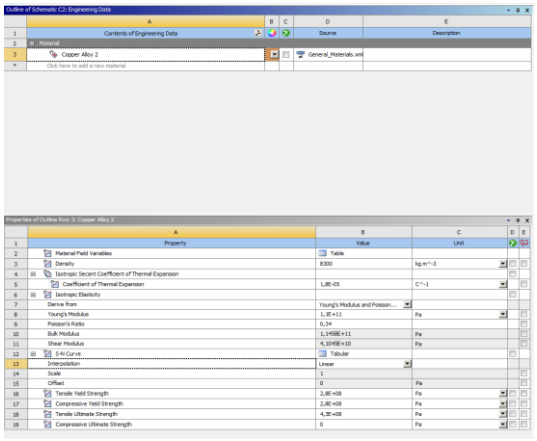
Berdasarkan Tabel 6. merupakan hasil *error* nilai *thrust* perhitungan dengan simulasi. Pada Tabel 7. Adalah hasil *error* nilai *torque* perhitungan dan simulasi. Hasil perhitungan *error* antara perhitungan dan simulasi memiliki nilai *error* yang dibawah 5%. Hasil ini sama dengan penelitian sebelumnya. [5]. Pada Gambar 9. menunjukkan grafik perhitungan dan simulasi nilai *thrust*. Untuk nilai *thrust* yang dihasilkan semakin tinggi nilai rpm maka nilai *thrust* dari simulasi maupun perhitungan akan semakin besar. Pada Gambar 10. menunjukkan grafik perhitungan dan simulasi nilai *torque*.

3.2.4 Simulasi *FEM*

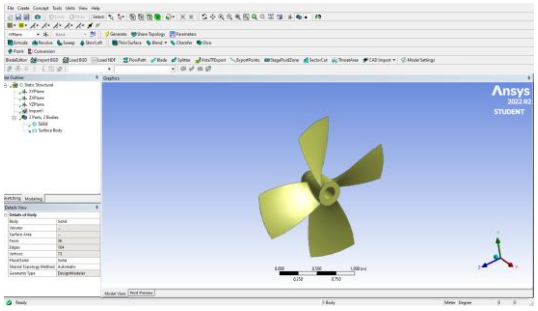
Setelah kita melakukan hasil *software CFD* tahap berikutnya ialah melakukan Analisis kekuatan dan kelelahan material dengan *software FEM* untuk mencari tingkat kelelahan propeller tersebut.

a. *Engineering Data*

Pemilihan material pada engineering data untuk model propeller yang akan digunakan. Pada penelitian kali ini material yang digunakan ialah Copper Alloy tertera pada Gambar 11.



Gambar 11. *Engineering Data*



Gambar 12. *Import Geometry Propeller*

Gambar 13. Hasil *Meshing software FEM*

Table 8. *Size Meshing*

Size	**Nodes**	**Element**
180 mm	115772	69933

b. *Geometry*

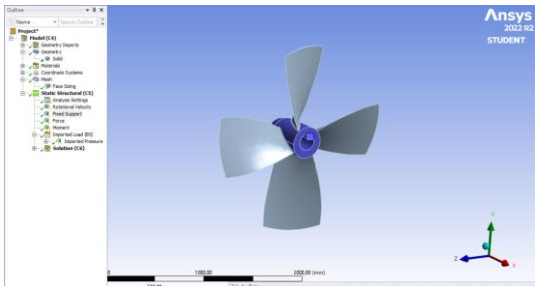
"Import" model *propeller* kita padaproses ini kita tidak memerlukan *boundary* yang dipakai pada saat *running CFD* kita hanya perlu model *propeller* saja. Gambar 12. Merupakan *import geometry propeller*.

c. Model

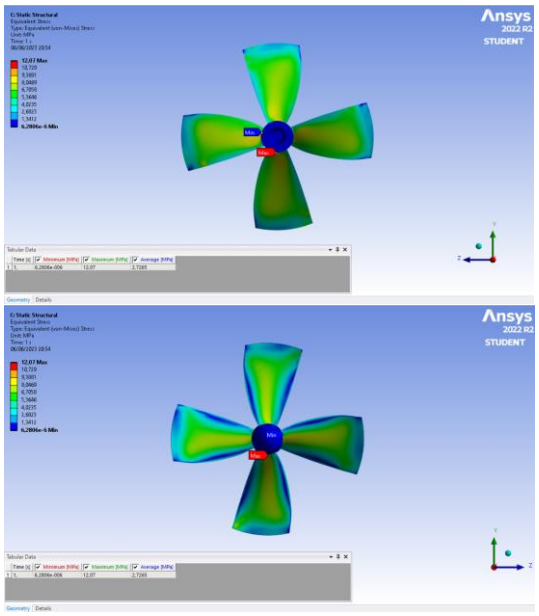
Pada tahap selanjutnya ialah setting untuk mesh. Gambar 13 adalah hasil *setting meshing* pada *propeller*. Pada *software FEM*, mesh yang digunakan berupa setting yang hampir sama seperti setting di *CFD* Semakin tinggi kerapatan mesh, maka semakin baik hasilnya. Tabel 8. Merupakan ukuran *meshing*.

d. *Set Up*

Set up adalah tahap importing pressure dan *fixed support*.



Gambar 14. Hasil *Fix Support*



Gambar 15. *Face Propeller and Back Propeller*

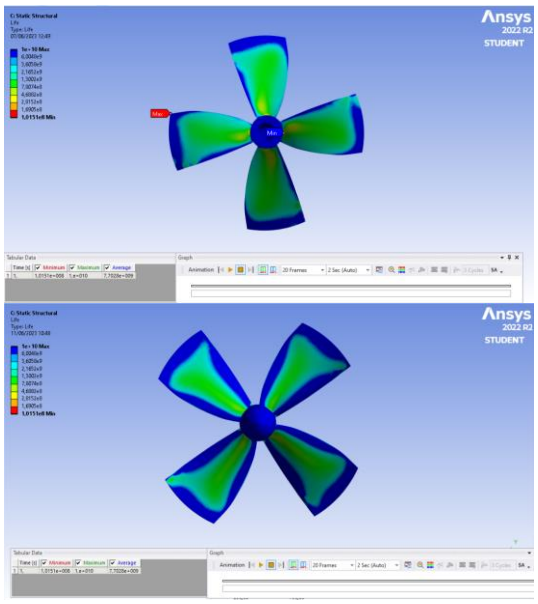
Table 9. Hasil *Von Misses Stress*

Variasi rpm	*Equivalen Stress (Von-Misses)* Minimal (Mpa)	Maksimal (Mpa)
198,53	$6{,}28 \times 10^{-6}$	12,07
238,24	$4{,}46 \times 10^{-4}$	34,646
357,35	$6{,}64 \times 10^{-5}$	97,393

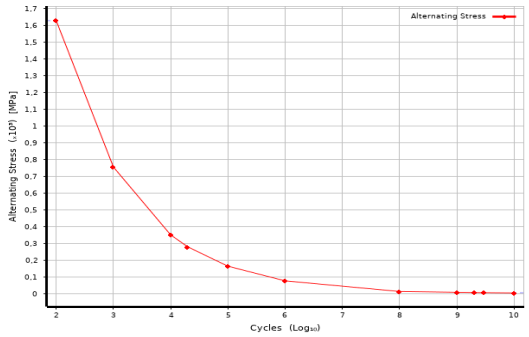
Gambar 14. merupakan area yang di *fixed support*. Tujuan *hub propeller* sebagai *fixed support* agar area yang di tuju tidak bergerak dan menjadi tumpuan pada saat model propeller nanti diberikan pembebanan.

3.2.5 *Hotspot Stress*

Kemudian kita masuk ketahap *solution* hal yang pertama kita input ialah menambahkan equivalent Stress dengan cara klik "Solution" lalu "Stress" kemudian kita cari "equivalent Stress (Von -Misses)" setelah itu kita klik "solve". Hasil tahap ini merupakan tahap paling penting karena ini merupakan tujuan utama kita untuk mencari titik hot spot stress yang diinginkan. Pada Gambar 21 dan Gambar 22 adalah hasil dari *software FEM*. Dari hasil pembebanan pada Tabel 9. tersebut di dapatkan nilai untuk rpm 198,53 di dapat nilai 12,07 Mpa dan juga minimum stress yaitu 6,2806e-006 Mpa. Hasil yang sama juga



Gambar 16. *Face Propeller Life Time*



Gambar 17. Kurva S-N

Table 10. *First-Order Fatigue Cycle*

Time	**300 Hari cycle**
1ST HOUR	1160000
ST DAY	3860000
1ST MONTH	1160000
1ST YEAR	85764960
2ND YEAR	428824800
10TH YEAR	857649600
15TH YEAR	1286474400
20TH YEAR	1715299200
25TH YEAR	2144124000

dibuktikan oleh [3] yang juga menunjukkan pada bagian root pada blade propeller.

3.2.6 Analisa Kelelahan

Pada Gambar 23 dan Gambar 24 adalah hasil dari life time pada software FEM. Hasil dapat di lihat dari area face dan back propeller. Dari penguraian tegangan seperti di atas maka bisa dibuat kurva tegangan bolak-balik dari model propeller. Kurva tersebut bisa didapatkan kurva S-N yang digunakan untuk memahami fenomena kelelahan nya. Pada software dilakukan proses *running* dengan cara menambahkan opsi Fatigue *Tool* pada *tab Solution*. Kemudian hasilnya bisa dilihat bahwa siklus terpendek dari *hot spot stress sebesar* 1,015 x 108 siklus. Gambar 25 merupakan hasil dari kurva S-N. Sehingga

semakin tinggi nilai stress yang dihasilkan maka waktu siklus yang dihasilkan akan semakin kecil.

3.2.7 Perkiraan Umur Material

Hasil siklus terpendek dari running menggunakan software bisa dipergunakan untuk mengetahui umur material propeller yang dianalisa menggunakan rumus first-order fatigue cycle.

a. Umur Material 198,53 rpm

$First - order\ fatigue\ cycle =$
$RPM\ x\ 60\ Minutes\ x\ 24\ Hours\ x\ Operating\ day\ in\ one\ years$

Setelah menghitung $First - order\ fatigue\ cycle$ pada Persamaan 2.4 akan menjadi dengan Tabel 10. Setelah itu menghitung fatigue life sesuai dengan pada Persamaan 2.5.

= 198,53 x 60 x 24 x 300
= 8,57 x 10^8

$$DM = \frac{9{,}81\ x\ 10^7}{1{,}015\ x\ 10^8}$$
$$DM = 0{,}966$$
$$Fatigue\ Life = \frac{Design\ Life}{DM}\ x\ Years$$
$$Fatigue\ Life = \frac{25}{0{,}966}\ x\ Years$$
$$Fatigue\ Life = 25{,}865\ Years$$

Berdasarkan perhitungan menunjukkan bahwa pada rpm 198,53 yang digunakan dengan lama pelayaran selama 300 hari memiliki pemakaian terkecil propeller memiliki umur pemakaian selama 25,865 tahun.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan keseluruhan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan dimana tingkat *thrust* dan torsi meningkat seiring dengan bertambahnya rpm. Hal ini disebabkan oleh putaran propeller yang tinggi menyebabkan gaya dorong dan torsi juga semakin besar. Oleh karena itu, thrust dan torsi yang terbentuk pun akan semakin tinggi.

Dari hasil pembebanan yang di hasilkan berupa pressure, force dan moment maka tegangan von-misses terbesar yang didapatkan baling-baling ialah sebagai berikut pada rpm 198,53 adalah 12,07 MPa. Serta untuk lokasi hot spot stress terdapat pada bagian root back dari blade propeller.

Pada perthitungan lifetime propeller adapun usia pakai yang terlama terdapat Pada propeller dengan RPM 198,53 dengan 300 hari masa pelayaran menghasilkan waktu terpendek masa pakai yaitu sebesar 25,865 tahun.

5. PUSTAKA

[1] R. I. Yaqin, A. B. Prasetiyo, P. Pritiansyah, M. H. Amrullah, and B. M. T. Pakpahan, "Studi Numerik Umur Kelelahan (Fatigue Life) Pada Propeller Kapal Penangkap Ikan Dengan Kapasitas Mesin 24 Hp," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.*, vol. 6, no. 1, pp. 8–17, 2020, doi: 10.31884/jtt.v6i1.245.

[2] H. A. H. Salam, I. P. Mulyatno, and M. Iqbal, "Analisa Kelelahan Propeller Kapal Ikan Pvc Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 1, pp. 243–252, 2017.

[3] R. A. Radyantama and H. Y. , Ahmad Fauzan Zakki, "Analisis Kelelahan Propeler KP-505 B-Series dengan Variasi Jumlah Daun pada Kapal Kontainer 3600 TEUs," *J. Tek. Perkapalan*, 2020, [Online]. Available: http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

[4] P. K. M.M Bernitsas., D. Ray, "KT, KQ, and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers," *Dep. Nav. Archit. Mar. Eng. Coll. Eng. Univ. Michigan Ann Arbor*, 1981.

[5] B. B. A. Pramesti, L., Witjonarko, R. D. E. ., & Aji, "Analisis Performa Propeller Kaplan 4-55 dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD)," *PPNS*, 2022, [Online]. Available: https://doi.org/10.33379/gtech.v6i2.1692

[6] KHAIRUNNISA, "Optimasi Desain Ponton Pengangkut Batu Bara 91 , 5 Meter Dengan Variasi Perubahan Jarak," *Tek. Jur. Kapal, Bangunan Perkapalan, Politek. Surabaya, Negeri*, 2022.

[7] R. Vijayanandh, K. Venkatesan, M. S. Kumar, G. R. Kumar, P. Jagadeeshwaran, and R. R. Kumar, "Comparative fatigue life estimations of Marine Propeller by using FSI," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1473, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1473/1/012018.

[8] N. V. A. Permadi and E. Sugianto, "CFD Simulation Model for Optimum Design of B-Series Propeller using Multiple Reference Frame (MRF)," *CFD Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 22–39, 2022, doi: 10.37934/cfdl.14.11.2239.