



Analisis Kelelahan *Propeller* Tipe *Kaplan-Series* Untuk Kapal Selam Komersial Dengan Variasi Jumlah *Blade*

La Ode Muh. Ayi Al Ma'rif¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki²⁾, Andi Trimulyono³⁾

¹⁾Laboratorium Perencanaan Kapal dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : laodemuhayialmarif@students.undip.ac.id, ahmadfauzanzakki@lecturer.undip.ac.id,
anditrimulyono@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Pada beberapa tahun terakhir, desain dari sistem propulsi kapal telah meningkat secara signifikan, termasuk pada desain *propeller*. Desain dan pengembangan *propeller* untuk kapal selam berbeda dengan kapal-kapal pada umumnya. Dalam proses desainnya sendiri meliputi perkiraan kecepatan, kekuatan, dan berat seperti desain pada umumnya. *Propeller* sendiri merupakan salah satu alat gerak kapal mekanik yang memberikan kekuatan dengan mengubah rotasi gerak ke gaya dorong, *propeller* sendiri terdiri dari beberapa *blade* dan beroperasi seperti perputaran pada skrup. *Propeller* pada umumnya, diletakkan pada kedudukan terendah pada bagian belakang kapal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui usia maksimum dari *propeller*, khususnya untuk tipe *Kaplan-series* dengan jumlah *blade* 6, 8, dan 10. Penelitian ini menggunakan *Finite Element Method* dengan bantuan aplikasi analisis *static structural*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa nilai usia paling panjang akan bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah *blade* pada *propeller*.

Kata Kunci : *Propeller*, *Kaplan-Series*, *Finite Element Method*, *Fatigue life*, Kapal Selam

1. PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun terakhir, desain dari sistem propulsi kapal telah meningkat secara signifikan, termasuk pada desain *propeller*. Desain dan pengembangan *propeller* untuk kapal selam berbeda dengan kapal-kapal pada umumnya. Dalam proses desainnya sendiri meliputi perkiraan kecepatan, kekuatan, dan berat seperti desain pada umumnya. [1]

Propeller sendiri merupakan salah satu alat gerak kapal mekanik yang memberikan kekuatan dengan mengubah rotasi gerak ke gaya dorong, *propeller* terdiri dari beberapa *blade* dan beroperasi seperti perputaran pada skrup. *Propeller* pada umumnya, diletakkan pada kedudukan terendah pada bagian belakang kapal [2]. Namun, harus diperhatikan bahwasanya *propeller* kapal harus memiliki kapasitas yang cukup untuk mendukung gaya yang bekerja padanya, seperti gaya dorong yang dihasilkan oleh *propeller* itu sendiri, tumbukan dan tekanan pada *propeller*, serta momen gaya. Jika *propeller* mengalami gaya yang disebutkan, maka

propeller kapal tersebut lama kelamaan akan retak dan akhirnya patah (*crack*)[3].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, menyebutkan bahwa penambahan dari skew, gaya sentrifugal (*centrifugal force*), dan juga sudut *rake* berpengaruh pada performa *propeller*. [4]

Dalam penelitian sebelumnya, kapal selam komersial telah didesain bentuk lambung dengan panjang 71,3 m dan bentuk *propeller* memiliki diameter 4,1238 m [5]. Dan didapatkanlah hasil analisis *propeller* tipe *Kaplan-series* paling efisien dan efektif. Variasi yang akan digunakan penulis dalam penelitian ini adalah jumlah *blade* 6, 8, dan 10 dengan sudut *rake* 15⁰ pada tiap *propeller* agar dapat memperkirakan usia (*fatigue life*) dari *propeller* tersebut.

Metode yang akan dipakai dalam menganalisis kali ini menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). CFD merupakan salah satu metode bercabang dari mekanika fluida.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui usia dari *propeller* tipe *Kaplan-Series* dengan variasi sudut *rake* 15° pada *propeller* dengan jumlah *blade* 6, 8, dan 10. Kecepatan (V_s) yang digunakan sebesar 4,218 m/s dengan kecepatan putaran sebesar 500 RPM yang didapatkan dari penelitian sebelumnya.

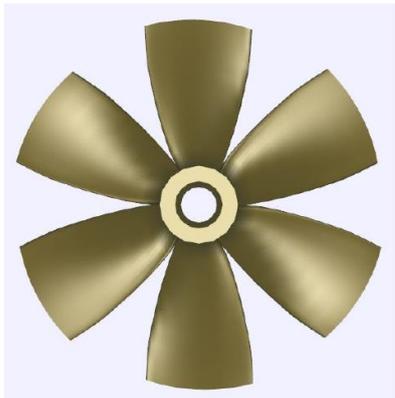
Penelitian ini sendiri dilaksanakan di Laboratorium Perencanaan Kapal dibantu Komputer, Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

2.1. Ukuran Utama *Propeller*

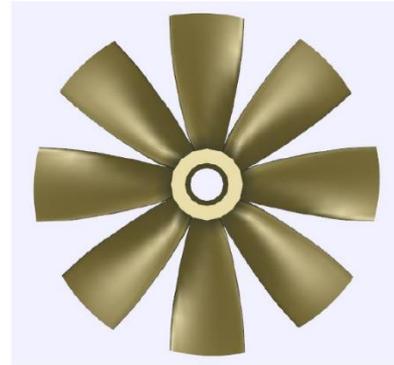
Propeller yang digunakan bersumber dari penelitian sebelumnya [5]. Ukuran utama sebagai berikut:

Tabel 1. Ukuran Utama *Propeller*

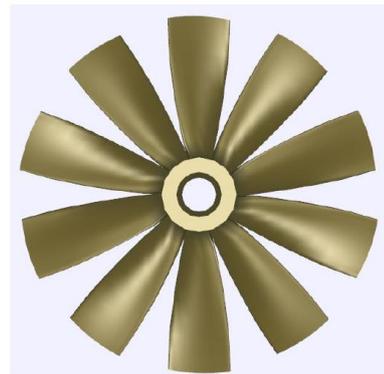
No	Spesifikasi	Dimensi
1	Jumlah daun	6, 8, dan 10 Buah
2	Tipe	Kaplan-series
3	Diameter	4,1238 m
4	Normal Pitch	4 m
5	Rake angle	15°
6	Blade area ratio	0.80
7	Arah putar	Searah jarum jam
8	Material	Alluminium Alloy



Gambar 1. *Propeller* dengan jumlah *blade* 6



Gambar 2. *Propeller* dengan jumlah *blade* 8



Gambar 3. *Propeller* dengan jumlah *blade* 10

Pemilihan jumlah *blade* 6, 8, dan 10 dengan sudut *rake* 15° dilandasi dari hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa semakin sedikit jumlah daun maka efisien semakin baik. Dan seiring pertambahan sudut *Rake* maka nilai efisiensi cenderung naik [5].

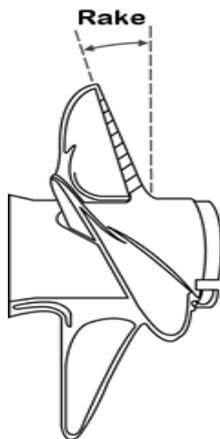
Tabel 2. Hasil Nilai Efisiensi

No	<i>Propeller</i>	Nilai Efisiensi
1	Kar680-5	11.5 %
2	Kar680-10	11.5 %
3	Kar680-15	11.6 %
4	Kar880-5	10.7 %
5	Kar880-10	10.8 %
6	Kar880-15	10.9 %
7	Kar1080-5	9.6 %
8	Kar1080-10	9.7 %
9	Kar1080-15	10.0 %

2.2. *Rake Angle Propeller*

Sudut *Rake propeller* merupakan sudut kemiringan antara *Blade propeller* dengan bagian tengah *propeller*. Sudut *Rake* pada baling-baling dibuat untuk menambah jumlah massa air yang dapat dihisap dan digunakan untuk menggerakkan kapal [6]. Sudut *Rake* sendiri dinyatakan dalam satuan derajat dan konfigurasi dari sudut *rake* dapat bernilai positif (condong menjauh dari perahu), negative (condong ke arah perahu), dan

netral (posisi daun tegak lurus dengan poros *propeller*) [7]. Fungsi dari sudut *rake* sendiri adalah untuk meningkatkan massa air yang diserap untuk kemudian dijadikan gaya dorong kapal[8].



Gambar 4. Rake Propeller

2.3. Fatigue Life Propeller

Pembuatan *propeller* sendiri, harus disertai dengan hasil analisa dari kelelahan *propeller* tersebut. Adapun usia kelelahan suatu *propeller* setidaknya mencapai 10^8 atau lebih besar[7].

first-order fatigue cycle merupakan perhitungan untuk mencari kelelahan pada *propeller* dimana tegangan yang diterima oleh *propeller* selama 1 putaran [9]. *First-order fatigue cycle* dituliskan dalam rumus:

$$\begin{aligned} & \text{First -order Fatigue Cycle:} \\ & = \text{RPM} \times 60 \text{ minutes} \times 24 \text{ hours} \times \text{operating} \\ & \quad \text{days in one year.} \end{aligned}$$

Perhitungan usia *propeller* secara umum memakai rumus untuk *Common Structural Rules* [9] dimana usia dari struktur tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$\text{Fatigue life} = \frac{\text{Design life}}{DM} \text{Years} \quad (1)$$

Design life adalah perencanaan usia dengan asumsi 25 tahun dan DM adalah *Cummulative Damage*.

Hasil analisa dari *life-cycles*, dapat dihitung menggunakan persamaan (1) untuk menghitung usia *propeller* dengan perhitungan dari *Cummulative Damage* menggunakan metode Palmgren - Miner[10] yang dinotasikan sebagai berikut:

$$D_m = \sum \frac{N_L}{N_I} = 1 \quad (2)$$

Dimana N_I adalah jumlah siklus yang diasumsikan 25 tahun. Sedangkan N_L adalah jumlah siklus perencanaan.

Komponen dari N_L pada persamaan (2) bisa dijabarkan sebagai berikut [9]:

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{design fatigue cyles}}{4 \log_{lpp}} \quad (3)$$

Dimana siklus dari perencanaan adalah 25 tahun dan L_{pp} adalah panjang kapal dari haluan kapal sampai buritan kapal.

2.4. Analisis Finite Element Method (FEM)

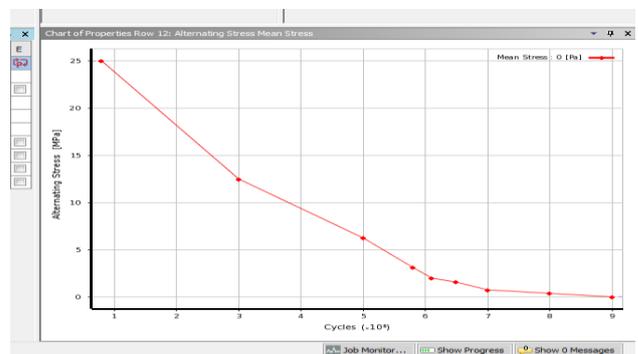
Dalam penelitian ini, penulis menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk mencari *equivalent stress* dan *fatigue cycles*. Aplikasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan aplikasi yang berguna untuk menghitung *static structural*.

Aplikasi ini berfungsi untuk menentukan jenis material yang akan dipakai pada *propeller*.

Pada aplikasi ini, sudah tersedia basis data untuk mencari sifat material. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah *aluminium alloy* dan Kurva S-N ditunjukkan pada gambar 5.

Tabel 3. Material Properties Alluminium Alloy

No	Material Properties	Nilai	Satuan
1	Temperature	22	°C
2	Density	2770	Kg.m ⁻³
3	Coeff. Thermal Expansion	$2,3 \times 10^{-5}$	C ⁻¹
4	Young Modulus	$7,1 \times 10^{10}$	Pa
5	Poisson Ratio	0,33	-
6	Bulk Modulus	$6,9608 \times 10^{10}$	Pa
7	Shear Modulus	$2,6692 \times 10^{10}$	Pa
8	Tensile Yield Strength	$2,8 \times 10^8$	Pa
9	Compressive Yield Strength	$2,8 \times 10^8$	Pa



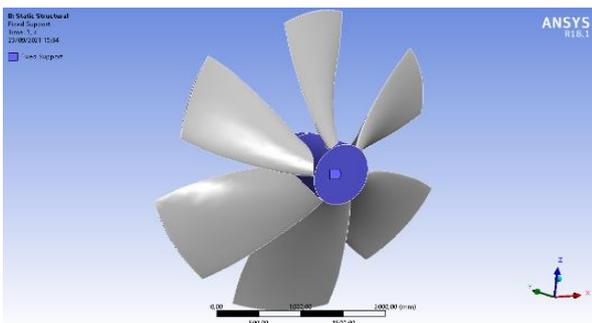
Gambar 5. Kurva S-N Alluminium Alloy

Setelah menentukan material yang akan digunakan, tahap selanjutnya adalah tahap *meshing*. Dimana pada tahap ini bertujuan untuk menentukan ukuran dari elemen yang akan digunakan pada saat *meshing* dari model. *Setting* dari *mesh* adalah sebagai berikut:

Tabel 4. *Setting Mesh*

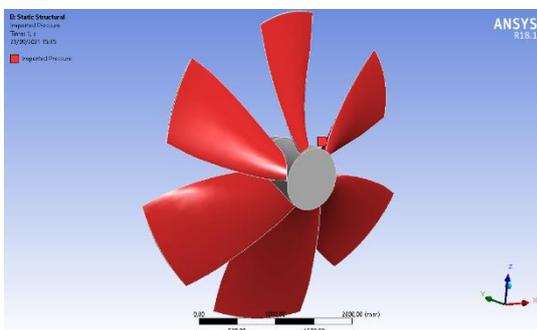
<i>Details of Mesh</i>	
<i>Physics Preference</i>	<i>Mechanical</i>
<i>Size Function</i>	<i>Curvature</i>
<i>Relevance Centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Transition</i>	<i>Slow</i>
<i>Spam Angle Centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>

Setelah melakukan *mesh*, tahap selanjutnya adalah *setup*. Hal yang dilakukan pada tahap ini adalah menentukan *fixed support* dan memasukkan *pressure* seperti pada gambar 6. *Fixed support* sendiri ditempatkan pada *hub propeller* yang bertujuan pada saat *mesh* dilakukan, *hub* tidak ikut teranalisis.



Gambar 6. Penentuan Fixed Support Hub Propeller

Gambar 7 merupakan Tahap untuk memasukkan *Import pressure*[5]. *Import pressure* sendiri dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dari tekanan pada masing-masing element.



Gambar 7. Import Pressure

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

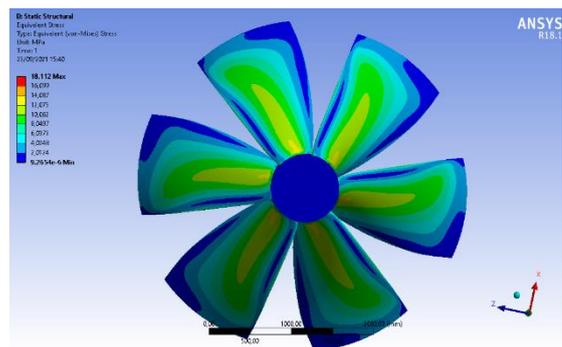
3.1. Hasil Analisis *Equivalent Stress (von-mises)*

Equivalent Stress (von-mises) merupakan nilai tegangan skalar yang dapat dihitung dari tensor tegangan [11]. Dalam hal ini, material itu bisa dikatakan mulai luluh ketika tegangan *von-Mises* mencapai nilai kritis yang diketahui sebagai *yield strength*.

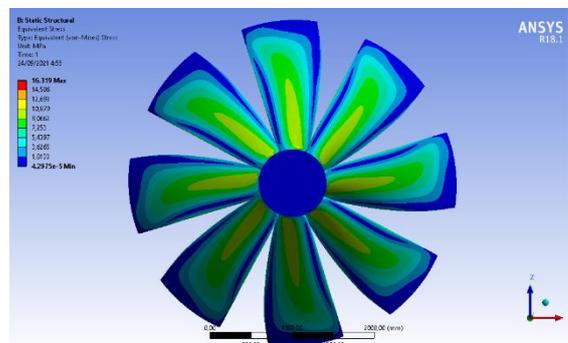
Analisis *equivalent stress (von-mises)* akan menghasilkan *hotspot stress* pada tiap element *propeller*. Hasil dari analisa *equivalent stress* sendiri dapat diperhatikan pada tabel 5 dengan kontur *stress* pada tiap sisi *propeller* digambarkan pada gambar 7-12

Tabel 5. Analisis *equivalent stress (von-mises)*

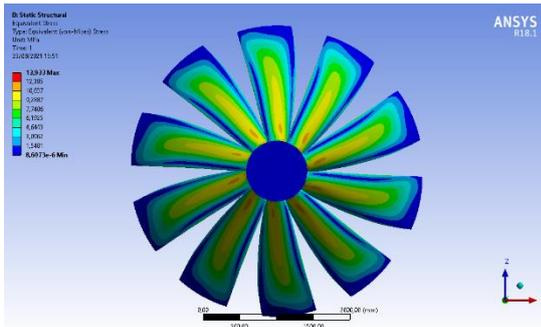
No	Variasi Blade	<i>Equivalent Stress</i> (MPa)
1	Blade 6	18,11
2	Blade 8	16,32
3	Blade 10	13,93



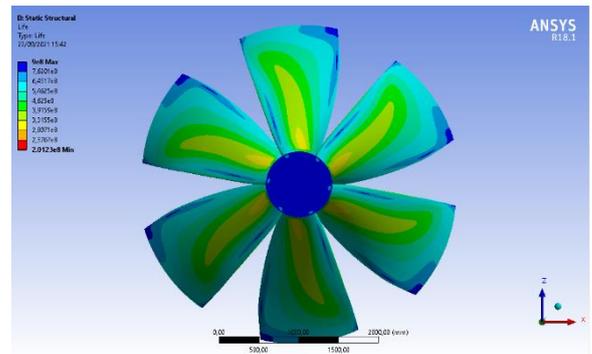
Gambar 8. *Equivalent Stress Blade 6*



Gambar 9. *Equivalent Stress Blade 8*



Gambar 10. Equivalent Stress Blade 10



Gambar 11. Life-Cycles pada blade 6

3.2. Hasil Analisis *Fatigue Life*

Analisis *life-cycles* sendiri mendefinisikan siklus dari *propeller* itu sendiri. Pada tahap ini, penulis akan melakukan analisis *fatigue life* dengan menghitung *life-cycles* menggunakan rumus *first order fatigue* dengan masa pelayaran 150 hari, 200 hari, dan 300 hari sebagai asumsi penulis. Hasil dari analisa *Life-Cycles* dapat dilihat pada tabel 6-8 dengan kontur *Life-Cycles* yang digambarkan pada gambar 13-18.

Tabel 6. *Fatigue Cycles* 150 Hari

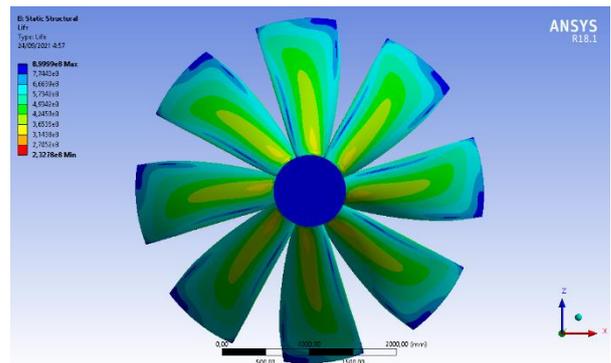
Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycle Minimum (N_i)		
		Blade 6	Blade 8	Blade 10
1 Years	$1,08 \times 10^8$			
10 Years	$1,08 \times 10^9$	2,0123	2,0123	2,0123
20 Years	$2,16 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$2,70 \times 10^9$			

Tabel 7. *Fatigue Cycles* 200 Hari

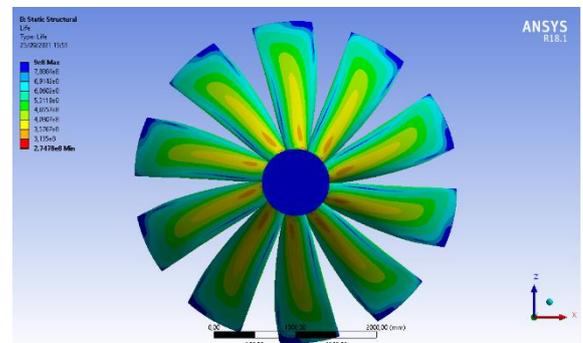
Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycle Minimum (N_i)		
		Blade 6	Blade 8	Blade 10
1 Years	$1,44 \times 10^8$			
10 Years	$1,44 \times 10^9$	2,0123	2,3278	2,7478
20 Years	$2,88 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$3,60 \times 10^9$			

Tabel 8. *Fatigue Cycles* 300 Hari

Operating Years	Fatigue Cycles	Life-Cycle Minimum (N_i)		
		Blade 6	Blade 8	Blade 10
1 Years	$2,16 \times 10^8$			
10 Years	$2,16 \times 10^9$	2,0123	2,3278	2,7478
20 Years	$4,32 \times 10^9$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^8$
25 Years	$5,40 \times 10^9$			



Gambar 12. *Life-Cycles* pada blade 8

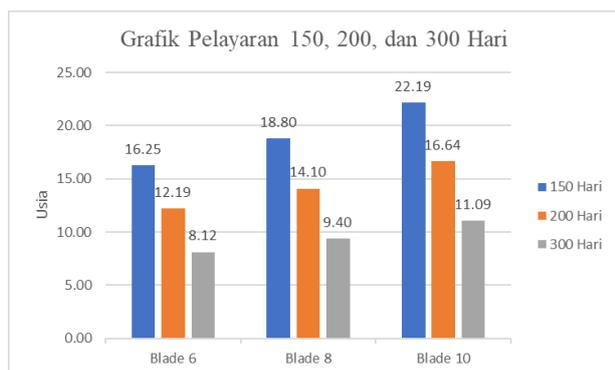


Gambar 13. *Life-Cycles* pada blade 10

Untuk perhitungan usia *propeller*, dapat dihitung menggunakan persamaan (2) dan (3). Hasil dari perhitungan usia kelelahan *propeller* selama 150 hari, 200 hari, dan 300 hari masa pelayaran sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil Perhitungan Pelayaran

Operating Days per Years	Usia <i>Propeller</i> (Years)		
	Blade 6	Blade 8	Blade 10
150 days	16,25	18,80	22,19
200 days	12,19	14,10	16,64
300 days	8,12	9,40	11,09



Gambar 14. Grafik Perhitungan Pelayaran

3.3. Pembahasan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa *life-cycles* akan semakin bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah *blade*. Hasil dari perhitungan pelayaran dapat dilihat pada grafik pada gambar 13 yang menunjukkan hasil dari perhitungan usia yang telah dilakukan. Hal ini sama seperti penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yang menyatakan bahwasanya penambahan jumlah *blade* dapat mempengaruhi usia dari propeller tersebut[1]

Nilai dari *life-cycle* yang diperoleh juga menunjukkan bahwa material yang dipakai untuk menganalisa *propeller* memiliki tingkat elastisitas yang tinggi sesuai dengan pedoman yang telah diteliti sebelumnya yang menyatakan bahwa material untuk propeller harus mencapai *life-cycles* minimal 10^8 [7]

Sudut *rake* menghasilkan pola aliran yang mempengaruhi distribusi tekanan statis pada *blade propeller* [12]. Maka seiring dengan bertambahnya sudut *rake*, nilai distribusi tekanan akan semakin menurun

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan oleh penulis, dapat disimpulkan bahwa tingkat *stress* pada *propeller* mengalami penurunan seiring bertambahnya jumlah *blade*. *Life-cycle* dan usia dari *propeller* itu sendiri akan semakin panjang jika jumlah *blade* bertambah baik itu pada masa berlayar 150 hari, 200 hari, maupun 300 hari dalam satu tahun dengan kondisi normal tanpa perbaikan. Dalam hal ini, penulis menyimpulkan bahwa *blade* 10 memiliki usia paling panjang dibandingkan *propeller* dengan jumlah *blade* 6 dan 8.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Andersen, J. J. Kappel, and E. Spangenberg, "Aspects of Propeller Developments for a Submarine," *Proc. First Int. Symp. Mar. Propulsors - smp'09*, no. June, pp. 554–561, 2009.
- [2] I. S. Arief, E. S. Koenhardono, and S. H. Ismail, *Analisa Performance Propeller B-Series dengan Pendekatan Structure dan Unstructure Meshing*, vol. 1, pp. G-241–G246, Sep. 2012.
- [3] A. H. S. Hilman, 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.
- [4] R. Rao, S. Mohan, and G. Kumar, "Determination of Fatigue Life of Surface Propeller by Using Finite Element Analysis," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 2492, no. 8, pp. 2492–2503, 2016.
- [5] Y. Dwi Putra, A. F. Zakki, and A. Trimulyono, "Perancangan Propeller Tipe Kaplan-series pada Kapal Selam Komersial dengan Variasi Sudut Rake dan Jumlah Daun untuk Mengoptimalkan Thrust," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, p. 262, 2020.
- [6] A. H. Techet, "Marine propellers," *2.016 Hydrodynamcs.*, vol. 3, pp. 2–3, 2005.
- [7] J. S. Carlton, *Marine propellers and propulsion*, 4th ed. London: Matthew Deans, 2018.
- [8] W. C. Ati, "Analisa Pengaruh Variasi Sudut Rake Propeller B-Series Terhadap Distribusi Aliran Fluida Dengan Metode CFD," *Tugas Akhir Jur. Tek. Sist. Perkapalan, Inst. Teknol. Sepuluh Nopember, Surabaya*, 2011.
- [9] IACS, "Bulk Carriers and Oil Tankers," 2014.
- [10] A. Risitano, D. Corallo, and G. Risitano, "Cumulative damage by Miner's rule and by energetic analisis," *SDHM Struct. Durab. Heal. Monit.*, vol. 8, no. 2, pp. 91–109, 2012, doi: 10.3970/sdhm.2012.008.091.
- [11] M. P. Antartika, B. Budianto, M. Ari, and K. Suastika, "Perbandingan Hasil Analisis Metode Elemen Hingga Berbasis Software Dengan Simple Supported Calculation Pada Kapal 50 Pax Crane Barge," *J. Integr.*, vol. 12, no. 1, pp. 72–78, 2020, doi: 10.30871/ji.v12i1.1451.

- [12] A. N. Hayati, S. M. Hashemi, and M. Shams, "A study on the effect of the rake angle on the performance of marine propellers," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 226, no. 4, pp. 940–955, 2012, doi: 10.1177/0954406211418588.