



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Pengaruh Modifikasi Sudut *Skew Propeller* B5-80 Terhadap Umur Kelelahan Pada Kapal *Kriso Container* 3600 TEUs

Raldimaz Islahan¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki²⁾, Imam Pujo Mulyatno^{3)*}

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: raldimazislah@gmail.com, ahmadfzakki@gmail.com, pujomulyatno2@gmail.com

Abstrak

Baling-baling kapal merupakan alat penghasil gaya dorong yang berasal dari mesin utama penggerak kapal dan bergerak secara dinamik. Gerakan tersebut akan mengakibatkan adanya beban yang bersiklus sehingga menyebabkan keretakan dari fenomena kelelahan suatu material. Umur kelelahan sangat berhubungan dengan hal tersebut dan dapat didefinisikan secara mudah, yaitu beban yang dapat diterima oleh suatu material atau benda sebelum mengalami kerusakan. Penelitian ini menggunakan metode *Finite element method* (FEM) dengan modifikasi sudut *skew* dari baling-baling kapal. Sudut *skew* yang digunakan adalah 30° , 32° , dan 34° . Hasil penelitian menunjukkan umur kelelahan baling-baling kapal dalam asumsi waktu pelayaran 150 hari pada sudut *skew* 30° sebesar 17,65 tahun, sudut *skew* 32° sebesar 18,31 tahun dan sudut *skew* 34° 18,30 tahun.

Kata Kunci : Baling-baling kapal, *Computational Fluid Dynamics*, Umur kelelahan, Metode Elemen Hingga

1. PENDAHULUAN

Dalam suatu sistem penggerak kapal, dibutuhkan baling-baling kapal sebagai alat penghasil gaya dorong yang berasal dari mesin utama penggerak kapal. *Fixed Pitch Propeller*, merupakan jenis baling-baling kapal yang paling banyak diproduksi dan paling populer, terutama pada jenis *mono-block* [1].

Dalam pemakaiannya, baling-baling kapal yang digunakan pada setiap kapal memiliki geometri yang berbeda sesuai kebutuhannya. Berbagai variasi seperti penggantian sudut *skew* dan *rake* menjadi opsi untuk meningkatkan performa dari baling-baling kapal. Sudut *skew* dapat diartikan sebagai sudut antara garis tengah poros sampai *blade tip*, dimana baling-baling kapal yang memiliki sudut *skew* lebih kecil juga memiliki tekanan yang lebih kecil juga [2].

Baling-baling kapal yang digunakan terus menerus akan mengalami titik kelelahannya. Umur kelelahan sangat berhubungan dengan hal tersebut dan dapat didefinisikan secara mudah, yaitu beban yang dapat diterima oleh suatu material atau benda

sebelum mengalami kerusakan. Dalam mencari umur kelelahan, dapat dilakukan analisa berbasis *finite element method* (FEM). Metode ini seringkali digunakan dalam menganalisa struktur yang melibatkan elemen-elemen struktur seperti gading dan plat baja [3].

Kelelahan dapat dikelompokkan menjadi 3 tahapan, yaitu:

- *Crack initiation*, pada tahapan ini, permulaan retak dicirikan dengan perilaku material yang terlihat pada penglihatan mikroskopik.
- *Crack propagation*, pada tahapan ini, keretakan menyebar pada material tersebut.
- *Final fracture failure*, pada tahapan ini, saat keretakan terjadi dalam ukuran yang kritis, dapat berakhir pada patahnya suatu material [10].

Penelitian ini akan membahas bagaimana kelelahan suatu baling-baling kapal *B-Series* pada 3 sudut *skew* yang berbeda, yaitu 30° , 32° , dan 34° . Pemilihan variasi sudut *skew* yang penulis pakai memiliki jarak yang kecil seperti yang telah

dilakukan oleh [2], dimana variasi yang digunakan pada pemilihan sudut *skew* memiliki jarak yang kecil. Hal tersebut memiliki beberapa keuntungan, di antaranya adalah kemudahan dalam membuat model baling-baling kapal pada *software rhinoceros* karena modifikasi yang diterapkan tidak terlalu banyak, sehingga dapat membuat penelitian yang dilakukan lebih efisien.

Pembuatan variasi sudut *skew* juga dapat dipilih dengan jarak yang lebih besar, seperti yang telah dilakukan oleh [7]. Variasi sudut yang lebih besar memungkinkan hasil yang didapatkan memiliki perbedaan yang lebih signifikan, tetapi modifikasi model baling-baling kapal akan lebih sulit dibandingkan dengan variasi sudut yang lebih kecil.

Modifikasi sudut *skew* pada baling-baling kapal dapat mempengaruhi dalam berbagai macam hal seperti pada penelitian yang telah dilakukan oleh [8] menyatakan sudut *skew* dapat mempengaruhi tekanan dan beban saat memecahkan fluida, sehingga jika perancang baling-baling kapal ingin mengurangi tekanan, sudut *skew* dapat ditingkatkan.

Kemudian perbedaan kemiringan *skew* mempunyai karakteristik yang fluktuatif pada tekanan yang diterima dan aliran turbulensi oleh baling-baling kapal pada *Rotation per-Minute* (RPM) tertentu [2]. Penelitian ini menunjukkan peningkatan sudut *skew* tidak selalu menimbulkan efek yang baik terutama dalam hal turbulensi.

Pengaruh selanjutnya adalah sudut *skew* juga dapat mempengaruhi gaya getaran pada baling-baling kapal di mana dalam meningkatkan sudut *skew* memiliki efek yang fluktuatif terhadap getaran baling-baling kapal [7].

Gaya dorong dan torsi dapat dipengaruhi oleh sudut *skew*, dengan semakin besarnya sudut *skew*, maka gaya dorong dan torsi baling-baling kapal akan semakin kecil [9]. Dari pengaruh yang sudah dijelaskan, modifikasi sudut *skew* memang harus dipertimbangkan.

Modifikasi sudut *skew* pada baling-baling kapal untuk mendapatkan umur kelelahan yang optimal masih sangat jarang dilakukan dan penulis belum menemukan referensi dalam hal tersebut. Namun dalam meneliti kelelahan baling-baling kapal sudah banyak dilakukan, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh [4], tetapi tanpa modifikasi apapun.

Pengaruh modifikasi sudut *skew* baling-baling kapal pada penelitian yang telah dilakukan memiliki pengaruh yang berbeda-beda di berbagai faktor. Penelitian yang penulis lakukan bertujuan untuk menemukan pengaruh dari modifikasi sudut *skew* baling-baling kapal terhadap umur kelelahan baling-baling kapal sehingga didapatkan umur

dalam satuan siklus dan tahun yang paling lama. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan untuk perancang baling-baling kapal, pemilik kapal dalam memilih sudut *skew* yang tepat dan dapat menjadi referensi akademis untuk mengembangkan penelitian dalam bidang yang sama.

2. METODE

Penulis melakukan penelitian ini untuk mengetahui kelelahan baling-baling kapal B5-80 dengan variasi sudut *skew* 30^o, 32^o, 34^o. Asumsi pemakaian baling-baling kapal yaitu dalam 150, 200, dan 300 hari pelayaran dalam waktu pemakaian selama 25 tahun. Baling-baling kapal tersebut didapatkan dari Kapal *Kriso Container 3600 TEUs*. Penelitian dilakukan dengan metode *Computational fluid dynamic* (CFD) dan *Finite element method* (FEM). Untuk mencari kelelahan baling-baling kapal, dibutuhkan tekanan yang disimulasikan pada *Ansys CFX* dengan menggunakan metode CFD. Kemudian mencari tegangan dan siklus umur kelelahan pada *Ansys Static Structure* dengan menggunakan metode FEM.

Beberapa keuntungan FEM adalah sebagai berikut:

- Jika dilakukan dengan uji eksperimen akurasi tinggi, maka dapat mengurangi waktu dan biaya dalam mendesain produk.
- Memiliki kemampuan untuk sistem penelitian di bawah kondisi yang berbahaya pada saat atau setelah melewati titik kritis (termasuk keselamatan dan skenario kecelakaan).
- Dalam proses desain, keakuratannya selalu dikontrol. [6].

Penelitian dilakukan pada Laboratorium Perencanaan Kapal dibantu Komputer Departemen Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro.

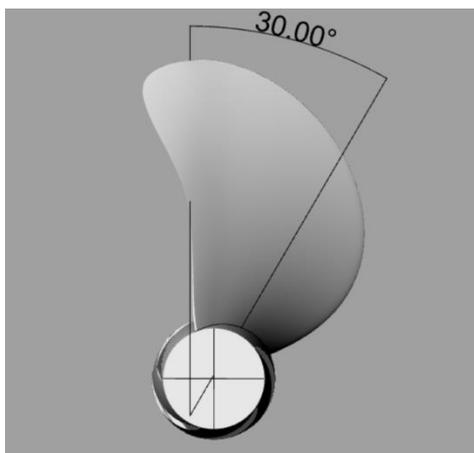
2.1. Data Penelitian

Data yang peneliti dapatkan berasal dari [12], dimana ukuran baling-baling kapal tersebut adalah sebagai berikut:

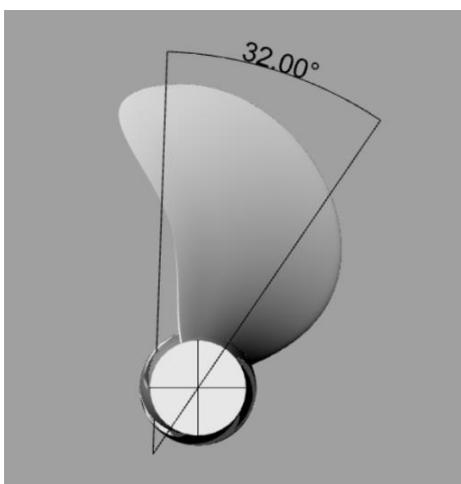
Tabel 1. Ukuran Utama *Baling-baling kapal*

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	Sudut <i>Skew</i>	32 derajat
7	Arah putar	<i>Clockwise</i>
8	Material	<i>Aluminium</i>
9	<i>Hub ratio</i>	0,18
10	Baling-baling kapal type	FPP
12	<i>Blade Area Ratio</i>	0,8002

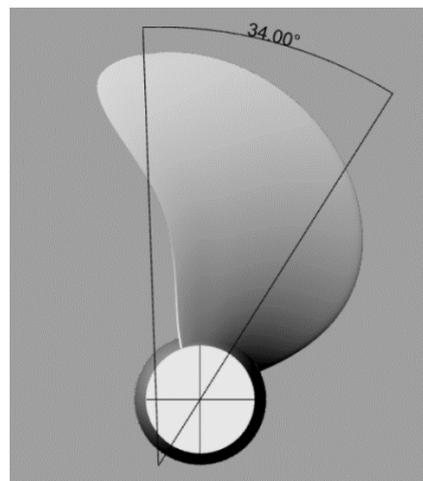
Ukuran utama baling-baling kapal yang peneliti dapatkan (tabel 1) kemudian didesain dengan *Rhinoceros 6.0*. Baling-baling kapal yang sudah didesain sesuai data yang ada, digunakan untuk analisis gaya dorong, torsi, dan siklus baling-baling kapal.



Gambar 1. Baling-baling kapal variasi sudut *skew* 30°



Gambar 2 Baling-baling kapal variasi sudut *skew* 32°



Gambar 3. Baling-baling kapal variasi sudut *skew* 34°

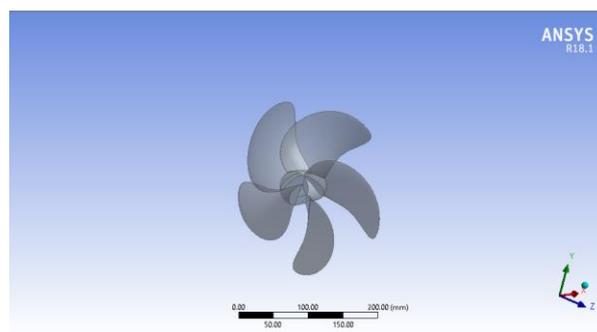
Untuk keperluan penelitian, baling-baling kapal diskalakan sebesar 1:31,6 sehingga baling-baling kapal yang sudah diskalakan memiliki diameter 250 mm. Skala ini bertujuan untuk memudahkan proses simulasi pada penelitian yang akan dilakukan (gambar 1, 2 dan 3)

2.2 Analisa *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Analisa CFD pada penelitian ini digunakan untuk menghitung gaya dorong dan torsi pada baling-baling kapal yang selanjutnya akan dilakukan validasi. Selain itu juga berguna untuk mencari tekanan yang dilanjutkan dengan simulasi *Finite Element Method* (FEM). Dalam analisa CFD, beberapa hal yang dilakukan adalah:

- *Pre Processor*
- *Post Processor*

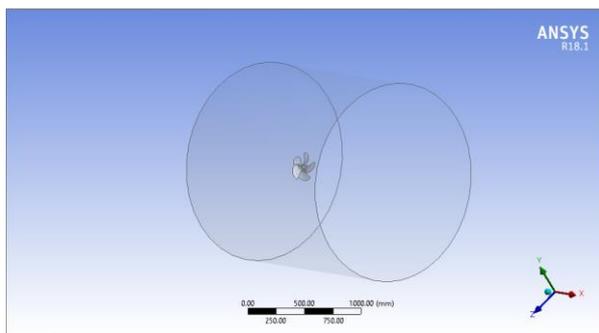
Untuk melakukan analisis, hal yang pertama dilakukan adalah memasukan model baling-baling kapal dari perangkat lunak *Rhinoceros 6.0* ke *Ansys CFX* (gambar 4). Setelah itu harus dipastikan model yang dimasukan sudah solid, tidak memiliki kecacatan, agar model tersebut dapat *dimeshing*.



Gambar 4. Model baling-baling kapal dari *Rhinoceros 6.0*

Jika sudah dipastikan model tidak memiliki kecacatan, maka langkah selanjutnya adalah pembuatan *boundary*. *Boundary* yang dibuat dalam analisa ini adalah dengan bentuk silinder, yang memiliki *inlet*, *wall* dan *outlet*. Penelitian dilakukan dalam satuan mm, dengan ukuran *boundary*, didapat dari penelitian yang telah dilakukan oleh [11] yang diuraikan sebagai berikut:

- Inlet* : 2 x Diameter baling-baling kapal, yaitu 500 mm
- Wall* : 3 x Diameter baling-baling kapal, yaitu 750 mm
- Outlet* : 5 x Diameter baling-baling kapal, yaitu 1250 mm (gambar 5).



Gambar 5. Tampilan baling-baling kapal dan *boundary* pada *Ansys CFX*

Jika *boundary* sudah terbentuk maka proses meshing dapat dilakukan. *Meshing* dilakukan dengan pengaturan (tabel 2) yaitu sebagai berikut:

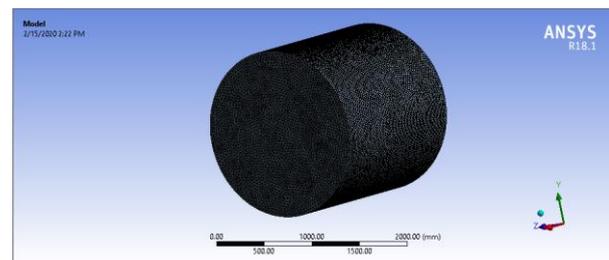
Tabel 2. Pengaturan *meshing* baling-baling kapal pada *Ansys CFX*

No	Pengaturan	Tipe yang digunakan
1	<i>Size function</i>	<i>Curvature</i>
2	<i>Initial size seed</i>	<i>Full assembly</i>
3	<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
4	<i>Transition</i>	<i>Slow</i>
5	<i>Span angle center</i>	<i>Fine</i>
6	<i>Smoothing</i>	<i>High</i>

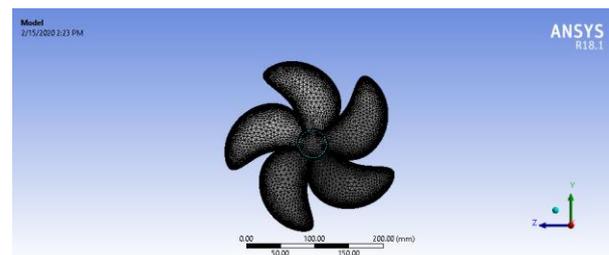
Proses ini berguna sebagai awalan proses sebuah Analisa *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dalam proses ini, didapatkan jumlah *element* (tabel 3) dimana semakin kecil *element* maka akan semakin akurat.

Tabel 3. Jumlah elemen hasil *mesh*

No	Indikator	<i>Skew</i> 30°	<i>Skew</i> 32°	<i>Skew</i> 34°
1	<i>Nodes</i>	501.026	579.276	578.160
2	<i>Element</i>	$2,7 \times 10^6$	$3,1 \times 10^6$	$3,1 \times 10^6$
3	Ukuran Minimal (m).	$4,51 \times 10^{-4}$	$4,51 \times 10^{-4}$	$4,51 \times 10^{-4}$
4	Ukuran Maksimal (m).	$5,00 \times 10^{-2}$	$5,00 \times 10^{-2}$	$5,00 \times 10^{-2}$



Gambar 6. *Meshing Boundary*



Gambar 7. *Meshing* baling-baling kapal

Setelah proses meshing (gambar 6 dan 7), *setup* dilakukan sebagai pengaturan segala hal yang berkaitan dengan analisa. Tahapan ini sangat penting karena dalam analisa CFD, dibutuhkan suatu pengaturan parameter-parameter yang tepat. *Domain* yang dibuat yaitu untuk fluida dan baling-baling kapal. Seluruh pengaturan berlaku untuk semua variasi, baik dengan sudut *skew* 30°, 32° maupun 34° (tabel 4 dan 5).

Tabel 4. Pengaturan domain untuk fluida pada *Ansys CFX*

No	Pengaturan	Tipe yang digunakan
1	Type	Fluid
2	Materials	Water
3	Fluid Definition	Material Library
4	Morphology	Continuous Fluid
5	Buoyancy Model	Non Buoyant
6	Domain Motion	Stationary
7	Reference Pressure	1 atm
8	Heat Transfer	None
9	Turbulence Model	k epsilon
10	Turbulent Wall	Scalable

Tabel 5. Pengaturan domain untuk baling-baling kapal pada *Ansys CFX*

No	Pengaturan	Tipe yang digunakan
1	Type	Solid
2	Materials	Solid
3	Fluid Definition	Material Library
4	Morphology	Continuous Solid
5	Buoyancy Model	Non Buoyant
6	Domain Motion	Rotating
7	Angular Velocity	-11.429 [rev s ⁻¹]
8	Axis Definition	Coordinate Axis
9	Rotation Axis	Global X
10	Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
11	Heat Transfer	None
12	Turbulence Model	k epsilon
13	Turbulent Wall	Scalable

Penamaan *inlet* memiliki tipe *boundary* nya adalah *inlet* juga, diibaratkan sebagai masuknya aliran fluida. *Normal Speed* diberikan pada massa dan momentum, yang berarti dari *inlet* fluida akan bergerak pada *inlet* dengan kecepatan yang ditentukan. Setelah penamaan *inlet*, selanjutnya penamaan pada *boundary wall*. Pengaturan *boundary wall* ini bertipe *wall*, karena memiliki fungsi sebagai bidang tertutup. Massa dan momentumnya menggunakan *Free slip wall* yang berarti fluida bergerak tanpa hambatan pada *wall*. Selanjutnya *boundary* yang disetup adalah *outlet*. *Outlet* memiliki lokasi pada ujung kolam *boundary* dengan terusan dari *inlet* dan memiliki tipe *boundary outlet*, karena fungsinya sebagai keluarnya fluida. Langkah berikutnya ialah *solver*. *Solver* mempunyai beberapa sub langkah, diantaranya adalah *solution unit*, *solver control*, *output control*, dan *expert parameter*. *Solution unit* adalah satuan unit untuk ukuran – ukuran yang diperlukan dalam simulasi. Setelah tahap pre-processor selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah *Solver/Processor* (pada tahap *Solution* di *CFX*). Dalam tahap ini proses perhitungan

(running) dilakukan berupa iterasi dari persamaan dasar dinamika fluida pada CFD.

2.2. Validasi KT-KQ-J Baling-baling kapal

Perhitungan gaya dorong pada baling-baling kapal dengan metode CFD pada *post processor* diambil dari tahap *results* yaitu pada *function calculator*, *function* yang diinginkan yaitu *force* dan torsi. Perhitungan ini dilakukan pada baling-baling kapal sudut *skew* 32⁰ (tabel 6) yaitu sebagai baling-baling kapal tanpa variasi, yang selanjutnya akan dilakukan validasi KT-KQ-J.

Tabel 6. Hasil analisis gaya dorong dan torsi

Sudut Skew	Gaya dorong (N)	Torsi (N m)
32	81,16	2,92

Validasi terhadap nilai gaya dorong dan torsi dilakukan guna melihat seberapa akurat dari penelitian menggunakan *Ansys* dan perhitungan secara manual dengan menggunakan pedoman dari kurva KT-KQ-J pada *Wageningen B-Series*. Validasi dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

$$J = \frac{Va}{n \times D} \quad (1)$$

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

$$KQ = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5} \quad (3)$$

Dimana KT adalah koefisien gaya dorong baling-baling kapal, KQ adalah koefisien torsi baling-baling kapal, J adalah koefisien *advanced* baling-baling kapal, C_T adalah koefisien beban gaya dorong, Va adalah kecepatan *advanced* (ft/s), D adalah diameter baling-baling kapal (ft), n adalah putaran baling-baling kapal (rev/s), T adalah gaya dorong baling-baling kapal (lbf), Q adalah torsi baling-baling kapal (lbf ft), ρ adalah massa jenis fluida (1,9905 s/ft³). Perhitungan validasi KT-KQ-J dilakukan dengan menggunakan ukuran baling-baling kapal dengan skala model (tabel 7)

Tabel 7. Ukuran baling-baling kapal dengan skala model

No	Ukuran	Besaran
1	Diameter	0,82 ft
2	Kecepatan putaran	11,426 rev/s
3	Va	6,56 ft/s
4	Massa jenis	1,9905 s/ft ³
5	P/D	0,99
6	AE/AO	0,8

- Menghitung gaya dorong dan torsi baling-baling kapal

$$J = \frac{Va}{nxD} = \frac{6,56}{11,426 \times 0,82} = 0,7$$

- Nilai KT dan KQ didapatkan pada grafik diagram KT, KQ, dan J pada lampiran.

$$0,155 = \frac{T}{1,9905 \times 11,426^2 \times 0,82^4} = 18,21 \text{ lb}$$

$$= 82,31 \text{ N}$$

$$0,037 = \frac{T}{1,9905 \times 11,426^2 \times 0,82^5} = 3,56 \text{ lb.ft}$$

$$= 2,82 \text{ N.m}$$

- Koreksi:
 - Gaya dorong = $(82,31 - 81,17) \div 82,31 \times 100\% = 1,39\%$
 - Torsi = $(2,92 - 2,82) \div 2,92 \times 100\% = 3,6\%$

Berdasarkan hasil validasi di atas, dapat dikatakan bahwa penelitian ini dikatakan valid. Karena eror yang terjadi masih berada dibawah 5%.

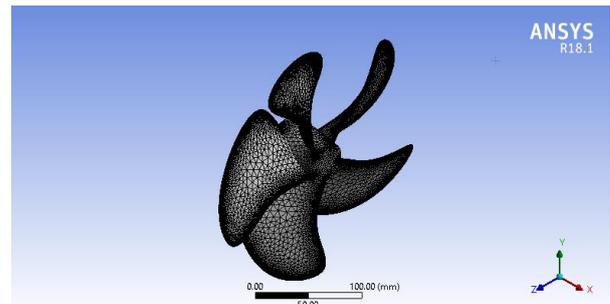
2.3 Analisis Finite Element Method (FEM)

Analisa FEM untuk menghitung kelelahan baling-baling kapal dilakukan setelah analisis CFD. Tahap pertama, adalah memasukan data terhadap material yang digunakan. Adapun material yang akan digunakan sudah tersedia di ANSYS. Material yang digunakan pada analisis kali ini ialah berjenis *aluminium alloy*.

Meshing dalam *Ansys Structural* juga dibutuhkan, namun hanya baling-baling kapalnya saja. Pengaturan *meshing* baling-baling kapal (tabel 8) adalah sebagai berikut

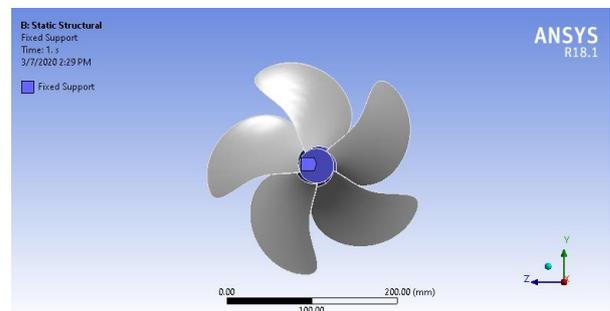
Tabel 8. Pengaturan *mesh* baling-baling kapal pada *Ansys Static Structural*

No	Pengaturan	Tipe yang digunakan
1	<i>Physics Preference</i>	<i>Mechanical</i>
2	<i>Size Function</i>	<i>Curvature</i>
3	<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
4	<i>Transition</i>	<i>Slow</i>
5	<i>Span Angle Center</i>	<i>Fine</i>



Gambar 8. Mesh baling-baling kapal

Selanjutnya setelah *meshing* (gambar 8), peneliti menentukan *fixed support* sebagai poros dari objek yang dianalisa. Dalam hal ini, poros nya adalah hub baling-baling kapal itu sendiri, karena sebagai *fixed support*, maka hub tersebut tidak ikut dianalisa kelelahannya (gambar 9).



Gambar 9. Penentuan *fixed support*

Dalam tahap *importing pressure* yang dilakukan adalah klik *imported load > import > solve*. Pada tahap ini pressure dari analisis sebelumnya dipetakan pada tiap-tiap elemennya.

Setelah itu, kita perlu mencari *equivalent stress* pada baling-baling kapal. Hal ini dilakukan supaya baling-baling kapal yang ingin kita analisis bisa menunjukkan tingkat kelelahannya, juga siklus umur kelelahan dari baling-baling kapal tersebut. *Equivalent stress* dapat kita atur dengan cara klik *Solution > Stress > Equivalent Stress (von-Mises) > Solve*.

Untuk melihat umur pada baling-baling kapal, peneliti harus mendefinisikan siklus umur kelelahan pada masing-masing baling-baling

kapaldengan klik *Solution > Tools > Fatigue Tool > Contour Result > Life > Solve*.

2.4 Perhitungan Umur Kelelahan Baling-baling Kapal dalam Satuan Tahun

Untuk menentukan umur kelelahan baling-baling kapal dalam satuan tahun, digunakan aturan *palmgren-milner* yang diambil dari [13] yaitu sebagai berikut:

$$\text{Umur Kelelahan} = \frac{\text{Umur desain (25 tahun)}}{D_m} \quad (4)$$

Dimana D_m adalah *cumulative fatigue damage*, yang kemudian diturunkan seperti yang telah dilakukan oleh [5] yaitu sebagai berikut:

$$D_m = \frac{N_L}{N_I} \quad (5)$$

$$N_L = \frac{0,85 \times \sum \text{Siklus kelelahan 25 tahun}}{4 \log Lpp} \quad (6)$$

Dimana N_L adalah total jumlah siklus yang direncanakan untuk 25 tahun, N_I adalah jumlah siklus hasil analisa, Lpp adalah panjang dari kapal yang dianalisa (m)[12]. Selanjutnya untuk \sum Siklus kelelahan sendiri didapatkan dari [1], dan dihitung berdasarkan waktu pelayaran selama 150, 200, dan 300 hari dengan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Siklus kelelahan} = \\ \text{RPM} \times 60 \text{ menit} \times 24 \text{ jam} \\ \times \text{waktu pelayaran (hari) dalam setahun} \end{aligned} \quad (7)$$

Berikut adalah contoh untuk perhitungan umur kelelahan baling-baling kapal sudut *skew* 30° selama 150 hari pelayaran, dengan pertama-tama menghitung siklus kelelahan memakai persamaan (7) untuk 150, 200 dan 300 hari pelayaran untuk memudahkan perhitungan yaitu dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil perhitungan siklus kelelahan baling-baling kapal yang direncanakan

Waktu (Tahun)	Siklus Kelelahan (150 hari)	Siklus Kelelahan (200 hari)	Siklus Kelelahan (300 hari)
1	1,48 x 10 ⁸	1,97 x 10 ⁸	2,96 x 10 ⁸
10	1,48 x 10 ⁹	1,97 x 10 ⁹	2,96 x 10 ⁹
20	2,96 x 10 ⁹	3,95 x 10 ⁹	5,92 x 10 ⁹
25	3,70 x 10 ⁹	4,94 x 10 ⁹	7,40 x 10 ⁹

Selanjutnya dilakukan perhitungan N_L menggunakan persamaan (6) yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_L &= \frac{0,85 \times \sum \text{Siklus kelelahan untuk 25 tahun}}{4 \log Lpp} \\ &= \frac{0,85 \times 3,70 \times 10^9}{4 \log 7,27} = 9,12 \times 10^8 \end{aligned}$$

Selanjutnya yaitu perhitungan D_m dengan menggunakan persamaan (5):

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{N_L}{N_I} \\ &= \frac{9,12 \times 10^8}{6,44 \times 10^8} = 1,42 \end{aligned}$$

Selanjutnya umur kelelahan dalam satuan tahun bisa didapatkan dengan persamaan (4) yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Umur kelelahan} &= \frac{\text{Umur desain (25 tahun)}}{D_m} \\ &= \frac{25}{1,42} = 17,65 \text{ tahun} \\ &= \mathbf{17 \text{ tahun 7 bulan}} \end{aligned}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari langkah-langkah penelitian yang sudah disebutkan di atas, akan didapatkan beberapa hasil seperti *equivalent stress* dan siklus umur kelelahan yang dipakai untuk mengetahui umur baling-baling kapal.

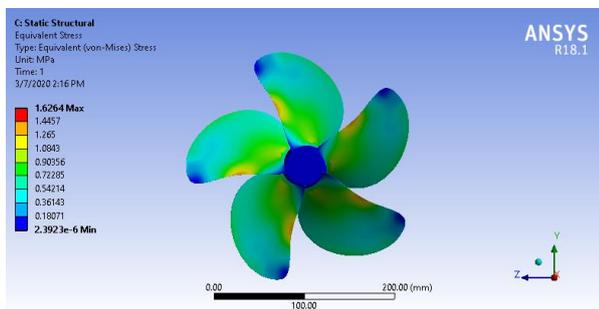
3.1. Equivalent Stress (von Mises)

Untuk mencari *equivalent stress* pada baling-baling kapal, dapat dilakukan dengan klik *Solution > Stress > Equivalent Stress (von-Mises) > Solve* (tabel 9)

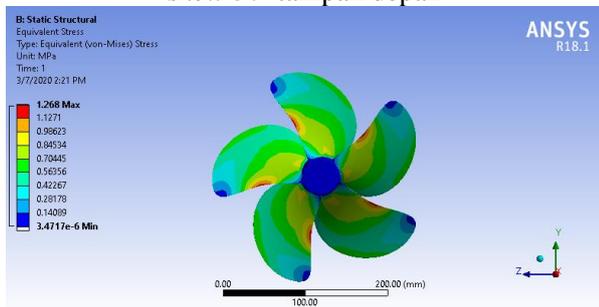
Tabel 10. Hasil *Equivalent Stress*

Sudut <i>Skew</i> ($^{\circ}$)	Minimal [Pa]	Maksimal [Pa]
30 $^{\circ}$	2,39	1,62 x 10 6
32 $^{\circ}$	3,50	1,268 x 10 6
34 $^{\circ}$	3,07	1,274 x 10 6

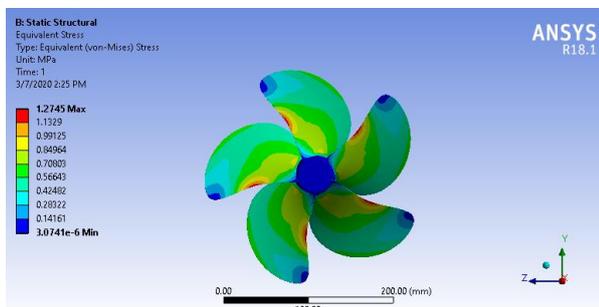
Dari hasil simulasi *equivalent stress* di atas, didapatkan hasil yaitu nilai tegangan maksimal untuk sudut *skew* 30 $^{\circ}$ sebesar 1,62 x 10 6 Pa, untuk sudut *skew* 32 $^{\circ}$ sebesar 1,268 x 10 6 Pa, untuk sudut *skew* 34 $^{\circ}$ sebesar 1,274 x 10 6 Pa. Semua variasi baling-baling kapal yang dibuat memiliki posisi *hotspot stress* pada *suction root* bagian belakang (gambar 10-15).



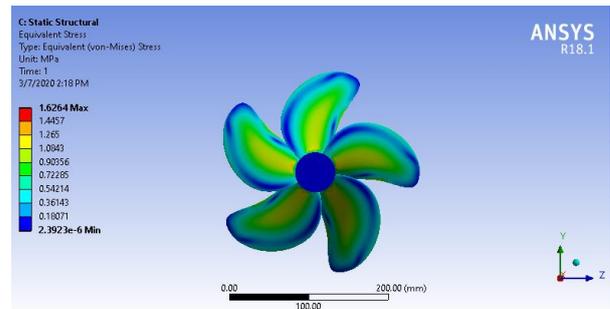
Gambar 10. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 30 $^{\circ}$ tampak depan



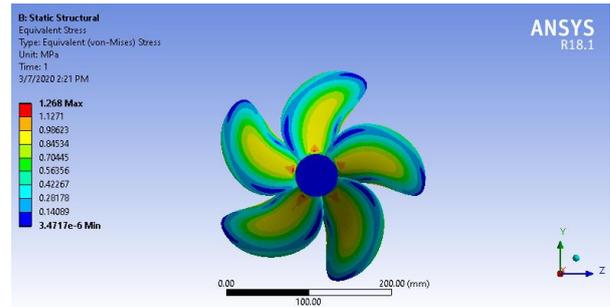
Gambar 11. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 32 $^{\circ}$ tampak depan



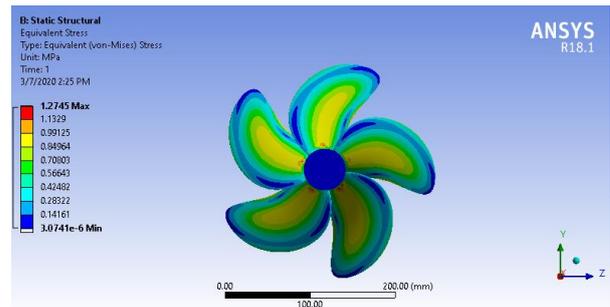
Gambar 12. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 34 $^{\circ}$ tampak depan



Gambar 13. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 30 $^{\circ}$ tampak belakang



Gambar 14. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 32 $^{\circ}$ tampak belakang



Gambar 15. *Equivalent stress* baling-baling kapal *skew* 34 $^{\circ}$ tampak belakang

3.2 Hasil Analisis Umur kelelahan

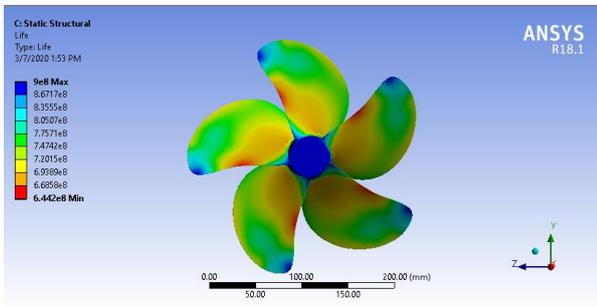
Setelah didapatkan hasil *equivalent stress* (*von mises*), langkah selanjutnya adalah menghitung siklus umur kelelahan dari masing-masing baling-baling kapal dengan hasil simulasi sebagai berikut:

Tabel 11. Hasil simulasi siklus kelelahan baling-baling kapal

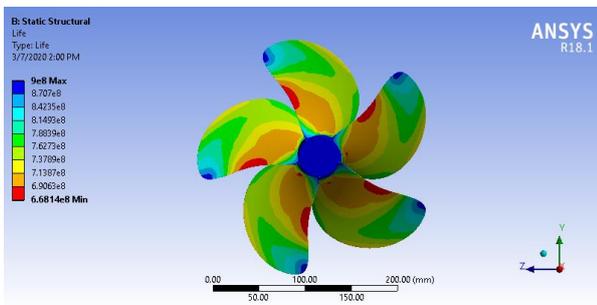
Sudut <i>Skew</i> ($^{\circ}$)	Siklus Kelelahan Hasil Analisa (Ni)
30 $^{\circ}$	6,44 x 10 8
32 $^{\circ}$	6,681 x 10 8
34 $^{\circ}$	6,677 x 10 8

Dari hasil simulasi *siklus umur kelelahan* di atas (tabel 10-12), didapatkan hasil untuk sudut *skew* 30 $^{\circ}$ memiliki *siklus umur kelelahan* 6,44 x 10 8 , sudut *skew* 32 $^{\circ}$ memiliki *siklus umur kelelahan*

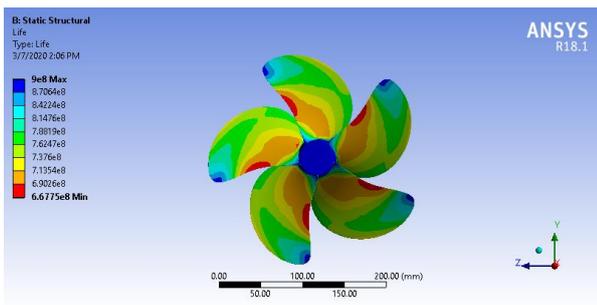
$6,681 \times 10^8$ dan sudut *skew* 34° memiliki *siklus umur kelelahan* sebesar $6,677 \times 10^8$ (gambar 16-21). Hal ini sesuai dengan pedoman pemilihan material untuk baling-baling kapal, dimana material sebuah baling-baling kapal harus mencapai tingkat kelelahan $>10^8$, hal ini menunjukkan bahwa material tersebut memiliki tingkat elastisitas yang cukup tinggi [1].



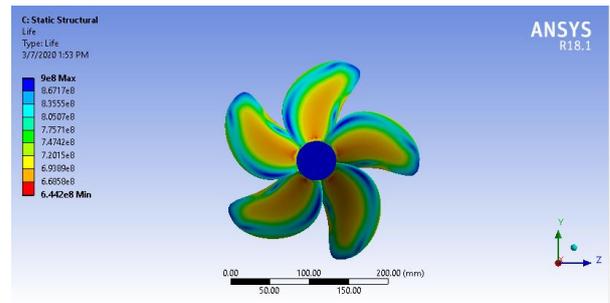
Gambar 16. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 30° tampak depan



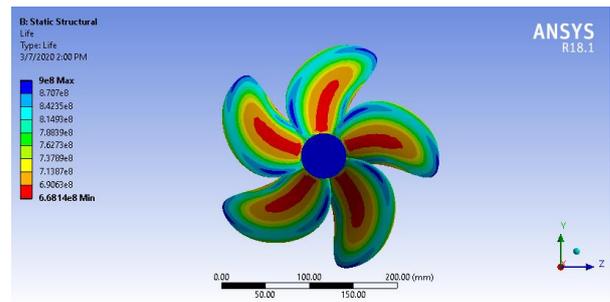
Gambar 17. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 32° tampak depan



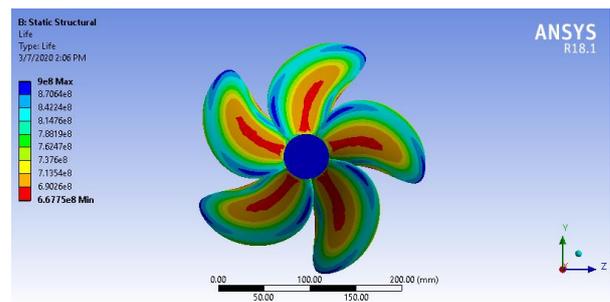
Gambar 18. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 34° tampak depan



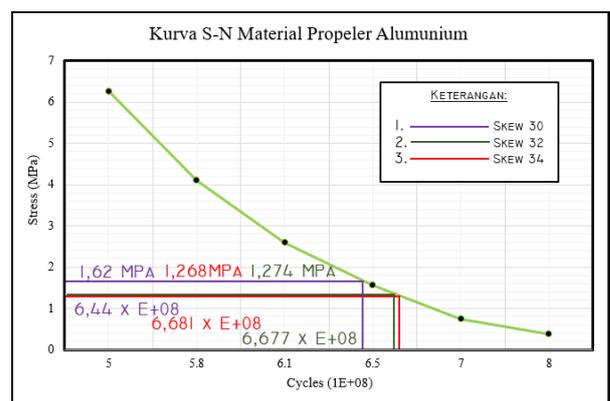
Gambar 19. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 30° tampak belakang



Gambar 20. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 32° tampak belakang



Gambar 21. Siklus umur kelelahan baling-baling kapal *skew* 34° tampak belakang

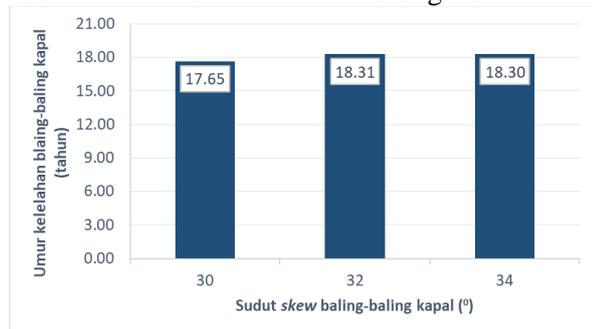


Gambar 22. Kurva S-N material baling-baling kapal aluminium

Gambar 22 menjelaskan tentang hubungan antara *equivalent stress*, siklus umur kelelahan dan Kurva S-N material aluminium [14] baling-baling kapal. Setelah kita mendapatkan keluaran simulasi *life-cycles* dari hasil simulasi di *Ansys Static Structural*, selanjutnya angka-angka tersebut kita

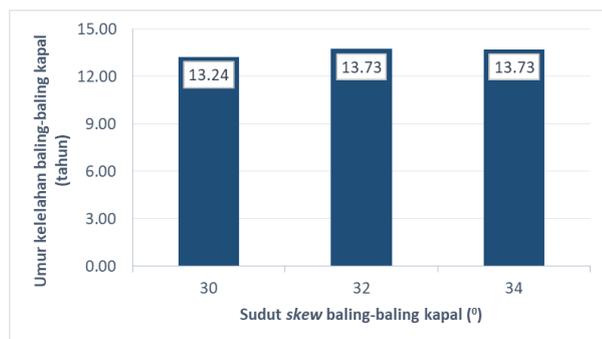
hitung dengan menggunakan aturan Palmgren-Milner.

Adapun hasil perhitungan umur kelelahan baling-baling kapal untuk waktu pelayaran selama 150 hari dalam setahun adalah sebagai berikut:



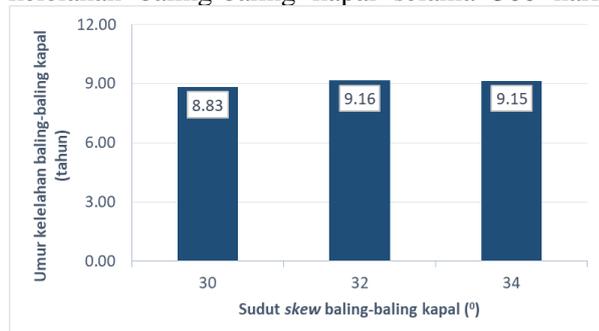
Gambar 23. Grafik umur kelelahan baling-baling kapal 150 hari pelayaran

Adapun selanjutnya ialah hasil perhitungan umur kelelahan baling-baling kapal untuk waktu pelayaran selama 200 hari dalam setahun adalah sebagai berikut:



Gambar 24. Grafik umur kelelahan baling-baling kapal 200 hari pelayaran

Selanjutnya untuk hasil perhitungan umur kelelahan baling-baling kapal selama 300 hari:



Gambar 25. Grafik umur kelelahan baling-baling kapal 300 hari pelayaran

Dari perhitungan di atas, didapatkan hasil dalam asumsi masa pakai baling-baling kapal selama 150 hari, umur baling-baling kapal pada sudut $skew$ 30° sebesar 17 tahun 7 bulan, sudut $skew$ 32° sebesar 18 tahun 3 bulan dan sudut $skew$ 34° 18 tahun 3 bulan. Untuk asumsi masa pakai

selama 200 hari, umur baling-baling kapal pada sudut $skew$ 30° sebesar 13 tahun 2 bulan, sudut $skew$ 32° sebesar 13 tahun 8 bulan dan sudut $skew$ 34° 13 tahun 8 bulan. Sedangkan untuk asumsi masa pakai selama 300 hari, umur baling-baling kapal pada sudut $skew$ 30° sebesar 8 tahun 9 bulan, sudut $skew$ 32° sebesar 9 tahun 1 bulan dan sudut $skew$ 34° sebesar 9 tahun 1 bulan (gambar 23-25). Gambar 23 dan 25 menunjukkan umur kelelahan baling-baling kapal mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan pada kenaikan sudut $skew$ dari 32° ke 34° , namun jika satuan desimal tersebut dikonversikan menjadi satuan waktu kalender, perbedaan tersebut hanya berbeda beberapa minggu dan dapat diabaikan.

4. KESIMPULAN

Modifikasi sudut $skew$ dapat mempengaruhi umur kelelahan baling-baling kapal, dan semakin tinggi sudut $skew$, maka umur kelelahan baling-baling akan semakin meningkat. Pengaruh ini dapat dijadikan rujukan untuk perancang dan pemilik kapal dalam pemilihan kemiringan sudut $skew$ untuk memperoleh umur kelelahan yang paling menguntungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*. 2012.
- [2] P. B. Setyabudi, D. Chrismianto, and G. Rindo, "Analisa Nilai *Thrust* dan *Torque Propeller* Tipe *B-Series* Pada Kapal Selam Midget 150m dengan Variasi *Skew Angle* dan *Blade Area Ratio* (AE/AO) Menggunakan Metode CFD," *J. Tek. Perkapalan*, 2016.
- [3] A. F. Zakki, *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*. 2014
- [4] R. Rao, S. Mohan, and G. Kumar, "Determination of Fatigue Life of Surface Propeller by Using Finite Element Analysis," *International Journal of Engineering Science and Computing*, Aug. 2016.
- [5] H. Salam, I. Mulyatno, and M. Iqbal, "Analisa Kelelahan *Propeller* Kapal Ikan PVC Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, 2017.
- [6] I. Ichwansyah, D. Chrismianto, E. S. Hadi, "Analisa Peningkatan *Thrust* Akibat Penerapan *Energy Saving Device* pada Kapal Perintis 500 DWT Menggunakan Metode CFD (COMPUTATION FLUID DYNAMIC)," *J. Tek. Perkapalan*, 2019.
- [7] W. Yehia, M. Mosaad, H. el-kilani, and M. Mosleh, "Skewed Propeller Design for Minimum Induced Vibrations," *1st Int. Symp.*

Nav. Archit. Marit. YTU campus, Istanbul (INT-NAM 2011) Oct. 24-25, 2011., Oct. 2011.

- [8] A. Trimulyono, P. Manik, and N. Huda, "PENGARUH PENGGUNAAN ENERGY SAVING DEVICE PADA PROPELLER B4 55 DENGAN METODE CFD," *Kapal*, 2013.
- [9] R. H. Wiaminaddin, I. S. Arief, and Amiadji, "Analisa Pengaruh Sudut *Skew* Terhadap Performa *Propeller* Dengan Pendekatan CFD," *Digital Library Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2011
- [10] Y. Bai, *Marine Structural Design*. 2003.
- [11] C. Parra, "Numerical Investigation of the Hydrodynamic Performances of Marine Propeller," *Master Thesis Double Degree of University of Liege Advanced Master in Naval Architecture and Ecole centrale de Nantes in Energetics and Propulsion*, 2013.
- [12] National Maritime Research Institute. *Kriso ContainerShip*. https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfd_ws05/Detail/KCS/kcs_g&c.htm [16 September 2019]
- [13] Biro Klasifikasi Indonesia, *IACS COMMON STRUCTURAL RULES FOR DOUBLE HULL OIL TANKERS*. 2014
- [14] European Space Agency. *Materials Science Research Project*. <http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Fatigue.html> [6 April 2020]