

ANALISA EFEKTIFITAS *WIND TURBINE* SUMBU VERTIKAL DENGAN VARIASI JUMLAH DAN KETEBALAN SUDU AIRFOIL NACA SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK TAMBAHAN PADA FISHERIES INSPECTION VESSEL 594 GT MENGGUNAKAN METODE CFD

P. Bobby Janurianto¹⁾, Untung Budiarto¹⁾, Eko Sasmito Hadi¹⁾

¹⁾Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Email: bjanurianto@gmail.com, budiartountung@gmail.com, ekosasmitohadi@yahoo.com

Abstrak

Konsep kapal dengan turbin angin dapat mengurangi pemakaian bahan bakar. Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa efektifitas energi yang dihasilkan dari turbin angin yang akan diinstalasi pada deck Fisheries Inspection Vessel 594 GT dengan variasi jumlah dan ketebalan blade. Turbin angin yang akan dianalisa merupakan tipe turbin angin sumbu vertikal. Variasi foil yang digunakan adalah NACA 0011, NACA 0015, NACA 0019 dengan variasi jumlah sudu 2, 3 dan 4. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa turbin berupa torsi, daya, dan koefisien power turbin pada setiap variasi. Menggunakan software Ansys CFX 14 untuk melakukan analisa gaya yang mempengaruhi gerak sudu turbin dan software Qblade v.0.91b untuk mencari koefisien power turbin angin. Berdasarkan hasil analisa didapatkan bahwa nilai torsi tertinggi adalah pada turbin angin dengan jenis foil NACA 0015 dan jumlah sudu 3 sebesar 759,13 Nm. Nilai daya dimiliki turbin NACA 0015 dengan jumlah sudu 3 sebesar 7614,09 Watt. Nilai koefisien power tertinggi dimiliki turbin NACA 0015 dengan jumlah sudu 3 sebesar 0,3603. Dapat ditarik kesimpulan turbin angin dengan foil NACA 0015 dengan jumlah 3 sudu merupakan geometri turbin yang paling optimum digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin ini.

Kata kunci: Energi Angin, *wind turbine*, NACA, torsi, daya, koefisien power

Abstract

The concept of a ship with a wind turbine can reduce fuel consumption. In this study, will be analyzed the effectiveness of the energy generated from wind turbines to be installed on deck Fisheries Vessel Inspection 594 GT with varying amounts and blade thickness. Wind turbines to be analyzed is a type of vertical axis wind turbines. Variations foil used is NACA 0011, NACA 0015, NACA 0019 with a variation of the number of blades 2, 3 and 4. The aim of this study was to determine the performance of a turbine in the form of torque, power, and power coefficient of the turbine at each variation. Using software Ansys CFX 14 for analyzing motion forces that affect turbine blades and software Qblade v.0.91b to look for wind turbine power coefficient. Based on the analysis results showed that the highest torque value is in wind turbines with a kind of foil NACA 0015 and the number of blades of 759.13 Nm 3. Values owned power turbine blades NACA 0015 with the number 3 at 7614.09 Watt. The coefficient of the highest power is owned turbine blade NACA 0015 with the number 3 at 0.3603. Wind turbines can be concluded with foil NACA 0015 with number three turbine blades is the most optimum geometry used in this wind power plant.

Kata kunci: Wind energy, wind turbine, NACA, torque, power, power coefficient

1. PENDAHULUAN

Pengembangan sumber energi alternatif angin sangat cocok digunakan dalam industri perkapalan mengingat di laut energi angin ini sangat besar jumlahnya. Pemanfaatan energi angin bisa dilakukan dengan cara pemasangan layar atau wind turbine pada kapal. Pada penelitian kali ini, peneliti akan menganalisa pengaruh dari variasi bentuk geometri dan jumlah sudu turbin. Variasi foil yang digunakan adalah NACA 0011, NACA 0015, NACA 0019 dengan variasi jumlah sudu 2, 3 dan 4.

Maksud dan tujuan dari penelitian ini yaitu menghitung pengaruh variasi jumlah dan ketebalan sudu terhadap torsi, power dan koefisien power turbin yang dihasilkan, mendapatkan turbin angin yang paling efektif untuk dipasang di kapal FIV 594 GT, dan menentukan kemungkinan ada atau tidaknya pengaruh momen inersia turbin angin terhadap stabilitas dan oleh gerak kapal.

Agar terdapat kesesuaian antara permasalahan dengan tujuan yang diharapkan maka dibuat batasan masalah penelitian yaitu menggunakan jenis aliran *steady-state* pada *inlet*, variasi geometri sudu menggunakan foil tipe NACA 0011, NACA 0015 dan 0019, sudu turbin divariasikan dengan jumlah dua, tiga dan empat sudu, hanya menggunakan *software CFD* dan *Qblade* untuk menganalisa.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi Terbarukan

Sebagian besar energi yang digunakan rakyat Indonesia saat ini berasal dari bahan bakar fosil yaitu minyak bumi, gas dan batu bara. Dengan adanya kebijakan pemerintah untuk melakukan penghematan energi, maka perlu dilakukan pencarian sumber energi yang ramah lingkungan dan terbarukan[3]. Adapun contoh dari energi terbarukan :

- Energi matahari (*solar energy*)
- Energi panas
- Energi air
- Energi angin

2.2. Energi Angin

Bentuk energi yang terdapat pada angin yang dapat diekstraksi oleh turbin angin adalah energi kinetiknya. Angin adalah massa udara yang

bergerak. Besarnya energi yang terkandung pada angin bergantung pada besarnya kecepatan angin dan massa jenis udara yang bergerak tersebut. Jika diformulasikan, besar energi kinetik yang terkandung pada angin atau udara bergerak yang bermassa m dan berkecepatan v adalah:

$$E = 0,5.m.v^2$$

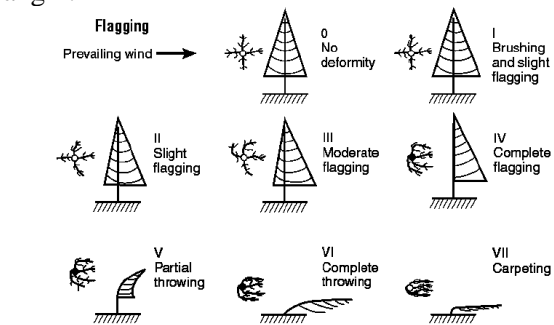
Dimana:

E = Energi Kinetik (joule)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Energi kinetik yang terdapat pada angin berbanding lurus dengan massa jenis udara (ρ) dan berbanding lurus dengan kuadrat dari kecepatannya. Parameter yang diukur dari angin umumnya adalah kecepatan dan arah angin, sedangkan kelembaban dan tekanan udara tidak berpengaruh besar pada proses konversi energi angin.



Indeks	satuan	I	II	III	IV	V	VI	VII
Kecepatan angin	mph	7 - 9	9 - 11	11 - 13	13 - 15	15 - 18	16 - 21	21+
	m/s	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	10+

Gambar 1. Indeks beserta deformasi yang terjadi pada pohon [2]

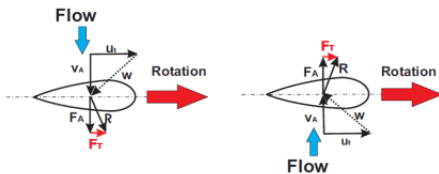
2.3 Wind Turbine

Turbin angin merupakan salah satu alat yang mekanisme gerakannya memanfaatkan energi angin. Banyak pemakaian turbin angin, khususnya di negara yang sudah berkembang, digunakan untuk menghasilkan listrik, turbin angin yang digunakan dapat menghasilkan kapasitas listrik yang cukup tinggi yaitu mencapai ratusan megawatt.

Adapun di negara berkembang, penggunaan turbin angin berada dalam skala riset. Hal ini dikarenakan teknologi yang berada di negara tersebut masih dalam tahap pengembangan untuk menghasilkan sebuah turbin angin yang bagus. Oleh karena itu, untuk riset turbin angin

akan dicari sebuah desain dan bahan beserta analisisnya untuk memuat turbin angin yang lebih baik dari sebelumnya.

Turbin angin adalah alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi gerak berupa putaran rotor dan poros generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi gerak yang berasal dari angin akan diteruskan menjadi gaya gerak dan torsi pada poros generator yang kemudian menghasilkan energi listrik.



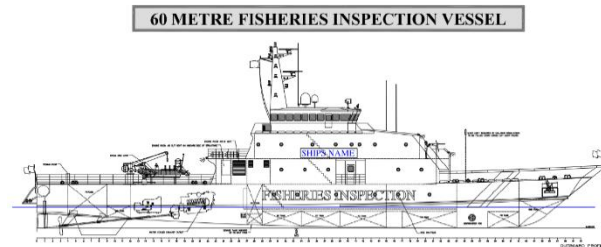
Gambar 2. Axial dan tangential force pada wind turbine [9]

2.4. Turbin Angin Vertikal Pada Kapal

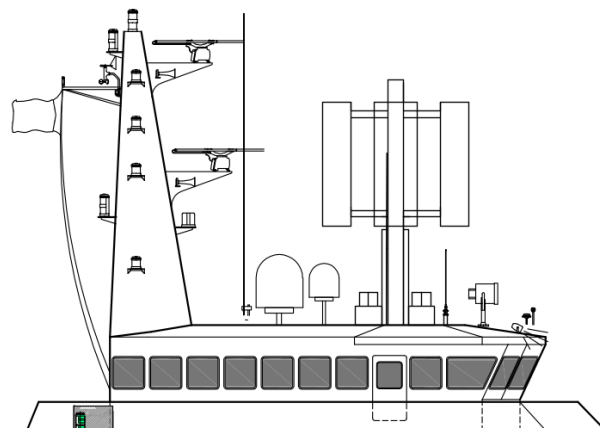
Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan magnus yaitu karena adanya selisih gaya drag pada kedua sisi rotor atau airfoil sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Kecepatan angin akan memberikan gaya ke blade turbin dan kemudian dicari variasi untuk wind turbine yang dapat bekerja pada kecepatan angin tersebut. Tujuan dilakukan variasi ini adalah agar didapatkan wind turbine yang paling optimum untuk dipasang di kapal. Dari jumlah daya yang dihasilkan oleh tiap-tiap wind turbine nantinya akan disimpan ke dalam baterai terlebih dahulu sebelum digunakan untuk penerangan sebagai antisipasi apabila kecepatan angin menurun atau terjadi kerusakan pada wind turbine.

Ukuran Utama Kapal :

Length Overall	: 60,00 m
Length Waterline	: 53,39 m
Beam Moulded	: 8,20 m
Beam Waterline	: 7,49 m
Depth Moulded	: 4,37 m
Draft Moulded	: 2,17 m
Draft Extreme	: 2,96 m
Crew	: 24 Person
Maximum Speed	: 24 Knot



Gambar 3. Fisheries inspection vessel 594 GT sebelum dipasang wind turbine



Gambar 4. Wind turbine yang telah dipasang pada Fisheries Inspection Vessel 594 GT

2.5. Gaya Aerodinamik

Pada sudu turbin angin akan terjadi tegangan geser pada permukaannya ketika kontak dengan udara. Distribusi tegangan geser pada permukaannya ketika kontak dengan udara. Distribusi tegangan pada permukaan sudu ini dipresentasi dengan adanya gaya tekan (drag) yang arahnya sejajar dengan arah aliran fluida dan gaya angkat (lift) yang arahnya tegak lurus dari arah aliran fluida. Kedua gaya ini menyebabkan sudu dapat berputar. Kedua gaya ini dipengaruhi oleh bentuk sudu, luas permukaan bidang sentuh dan kecepatan angin tersebut.

2.6. Airfoil

Airfoil adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu body airfoil. Geometri airfoil memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik

aerodinamika dengan parameter penting berupa CL, dan kemudian akan terkait dengan lift (gaya angkat yang dihasilkan). Sekitar tahun 1932, NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) melakukan pengujian beberapa bentuk airfoil yang dikenal dengan NACA seri 4 digit. Distribusi kelengkungan dan ketebalan NACA seri empat ini diberikan berdasarkan suatu persamaan. Distribusi ini tidak dipilih berdasarkan teori, tetapi diformulasikan berdasarkan pendekatan bentuk sayap yang efektif yang digunakan saat itu, seperti yang dikenal adalah airfoil Clark Y.

2.7. Pengenalan Perangkat Lunak CFD

Komputasi dinamika Fluida biasanya disingkat sebagai CFD (Computational Dynamics Fluid), merupakan suatu teknologi komputasi yang memungkinkan anda untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir. CFD adalah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numeric dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan dari aliran fluida tersebut. Secara definisi, CFD adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika).

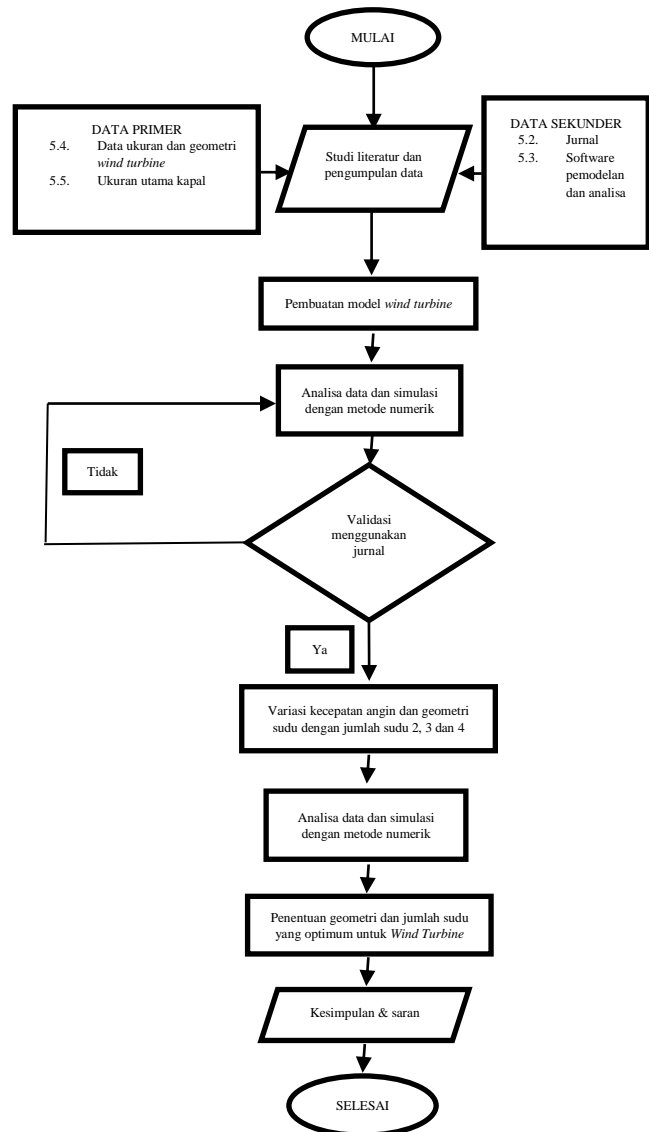
Computational Fluid Dynamics terdiri dari tiga elemen utama yaitu:

- a. *Pre Processor*
- b. *Solver Manager*
- c. *Post Processor*

3. METODOLOGI PENELITIAN

Dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan data berupa ukuran dan geometri turbin, ukuran utama kapal, jurnal dan juga software pemodelan dan analisa. Tahap berikutnya adalah pembuatan model turbin angin itu sendiri untuk selanjutnya dianalisa dengan menggunakan software berbasis perhitungan numerik. Setelah mendapatkan output lalu divalidasikan dengan jurnal yang digunakan, apabila hasil belum sesuai atau belum mendekati dari data yang terdapat pada jurnal maka dilakukan analisa ulang menggunakan software dan apabila hasil telah sesuai atau mendekati dengan data yang terdapat pada jurnal maka dilanjutkan dengan memperbesar ukuran

turbin dan memvariasikan jumlah sudu, kecepatan angin dan ketebalan sudu itu sendiri. Kemudian dianalisa menggunakan software dan mendapatkan hasil untuk tiap variasi turbin angin yang berbeda. Diakhiri dengan penarikan kesimpulan dan juga saran. Tahapannya digambarkan dalam flowchart berikut :



Gambar 5. Diagram alir penelitian

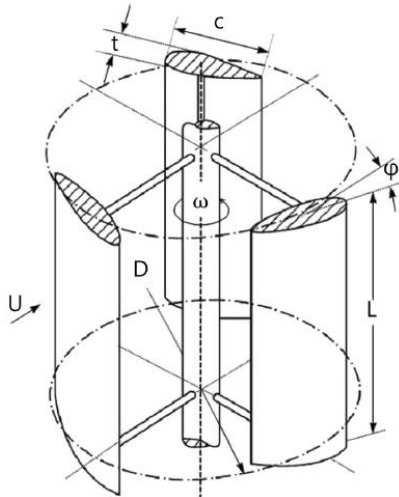
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perhitungan Validasi Tip Speed Ratio dan Power Coefficient

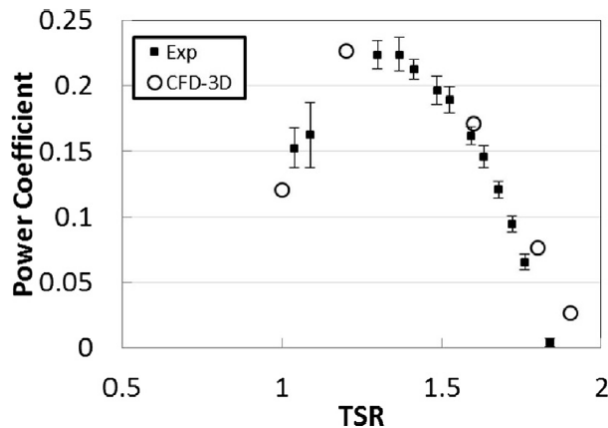
Perhitungan Validasi menggunakan software pemodelan dan analisa CFD ANSYS FLUENT® 2014 dengan acuan vertical axis wind

turbine tipe darrieus blade. Sudu turbin menggunakan jenis NACA series, dalam hal ini adalah NACA 0015. Berikut spesifikasi detailnya :

- Whole length of a blade (L): 600 mm
- Rotor diameter (D) : 740 mm
- Chord length (c) : 200 mm
- Inlet wind speed (U) : 12 m/s



Gambar 6. Sketsa turbin yang dijadikan sebagai acuan [1]



Gambar 7. Perbandingan nilai TSR (sumbu x) dan nilai power coefficient (sumbu y) [1]

Perhitungan *Tip Speed Ratio*. Tip speed ratio merupakan perbandingan antara tip speed blade dengan kecepatan angin inlet.

$$TSR = \frac{\text{Tip speed}}{\text{Wind speed}} = \frac{\omega \times R}{U_{\infty}} \quad (1)$$

Dimana :

- ω = Rotor Rotational Speed (rad/s)
- R = Rotor Radius (m)
- U_{∞} = Wind Speed (m/s)

Perhitungan *Power Coefficient*. Power Coefficient merupakan perbandingan antara power yang dihasilkan oleh wind rotor dengan power yang dihasilkan oleh angin oleh karena energi kinetiknya.

$$C_p = \frac{Q\omega}{0,5\rho AU^3_{\infty}} \quad (2)$$

Dimana :

- Q = Torque (Nm)
- ω = Rotor Rotational Speed (rad/s)
- ρ = Air Density (kg/m³)
- A = Cross sectional area of the rotor (m²)
- U_{∞} = Wind Speed (m/s)

Perhitungan nilai torsi didapatkan dari hasil kali gaya tangensial dengan jari-jari turbin. Dinyatakan dalam persamaan :

$$Q = F\phi \times R \quad (3)$$

Dimana

- Q = Torsi (Nm)
- $F\phi$ = Gaya Tangensial (N)
- R = Jari-jari (m)

Tabel 1. Daya dan persentase error turbin angin

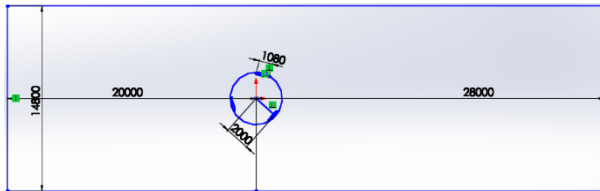
	Daya Turbin Angin (Watt)	Persentase Error (%)
ACUAN	107,11	-
CFD	104,55	2,39
QBLADE	103,71	3,17

4.2. Penentuan Nilai Parameter Tetap dan Peubah

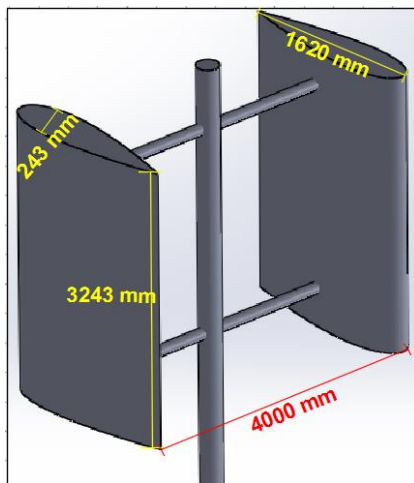
Tabel 2. Parameter tetap dan peubah

Parameter Peubah		
No	Parameter	Value
1	Whole Length of a Blade	: 3243 mm
2	Rotor Diameter	: 4000 mm
3	Inlet Wind Speed	: 24 knots
4	Tebal Airfoil	: 11 % blade chord airfoil
		: 15 % blade chord airfoil
		: 19 % blade chord airfoil
5	Blade Number	: 2 (Chord Length = 1620 mm)
		: 3 (Chord Length = 1080 mm)
		: 4 (Chord Length = 810 mm)
Parameter Tetap		
No	Parameter	Value
1	TSR	: 1,3
2	Solidity	: 0,81

4.3. Perhitungan Torsi, Daya dan Koefisien Power Berdasarkan Variasi Jenis dan Jumlah Sudu



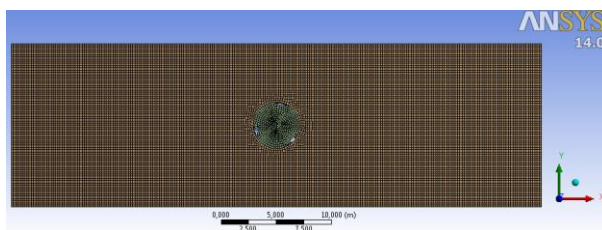
Gambar 8. Ukuran domain



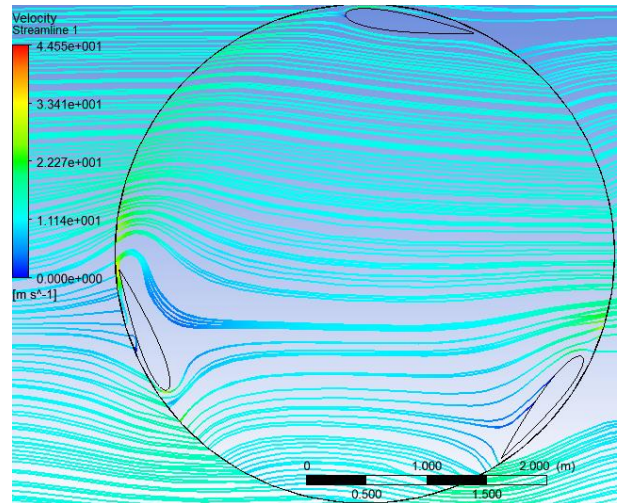
Gambar 9. Ukuran geometri turbin 2 sudu



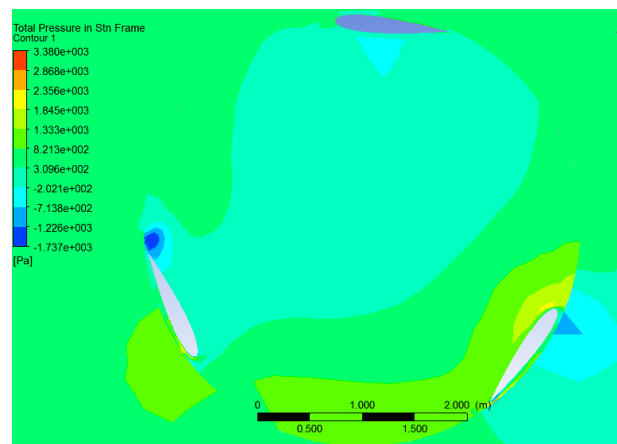
Gambar 10. Pemberian penamaan domain



Gambar 11. Proses Meshing



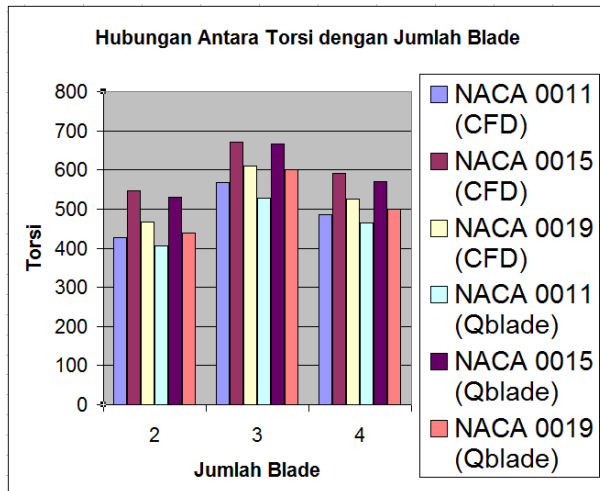
Gambar 12. Velocity streamline simulation



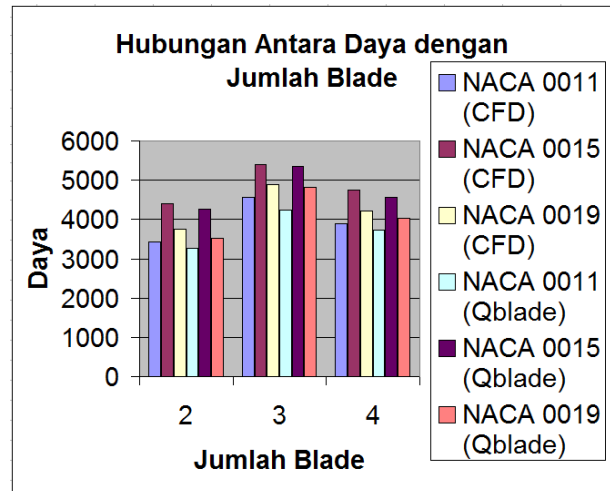
Gambar 13. Total pressure contour

Tabel 3. Nilai Torsi Turbin (Nm)

Foil	2	3	4
NACA 0011 (CFD)	426,18	568,04	485,20
NACA 0015 (CFD)	547,16	671,34	590,18
NACA 0019 (CFD)	467,46	609,14	525,74
NACA 0011 (Qblade)	405,87	527,00	464,01
NACA 0015 (Qblade)	531,29	665,46	569,67
NACA 0019 (Qblade)	439,04	600,80	500,54



Gambar 14. Grafik nilai torsi turbin



Gambar 16. Grafik nilai daya turbin

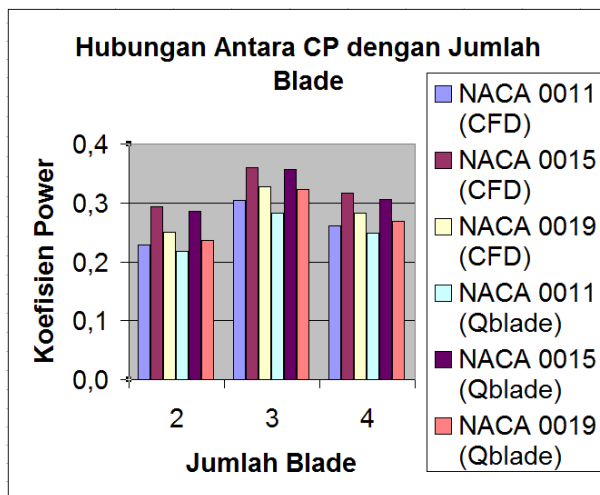
Tabel 4. Nilai CP turbin

Foil	2	3	4
NACA 0011 (CFD)	0,2287	0,3048	0,2604
NACA 0015 (CFD)	0,2936	0,3603	0,3167
NACA 0019 (CFD)	0,2508	0,3269	0,2821
NACA 0011 (Qblade)	0,2178	0,2828	0,2490
NACA 0015 (Qblade)	0,2851	0,3571	0,3057
NACA 0019 (Qblade)	0,2356	0,3224	0,2686

4.4. Perhitungan Torsi, Daya dan Koefisien Power Berdasarkan Variasi Kecepatan Angin dan Jumlah Blade

Tabel 6. Nilai torsi turbin

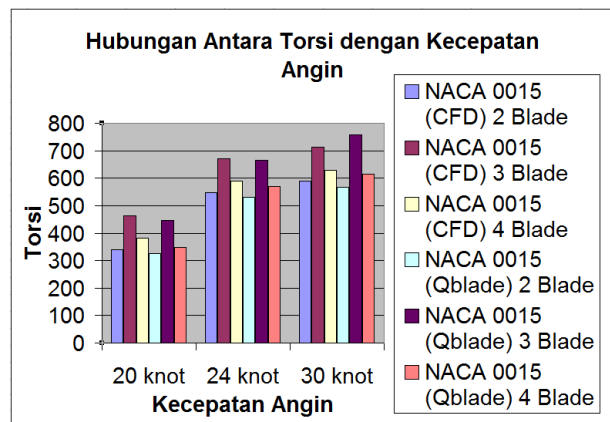
Foil	20 knot	24 knot	30 knot
NACA 0015 (CFD) 2 Blade	339,46	547,16	590,18
NACA 0015 (CFD) 3 Blade	464,38	671,34	713,96
NACA 0015 (CFD) 4 Blade	381,30	590,18	630,16
NACA 0015 (Qblade) 2 Blade	326,81	531,29	567,97
NACA 0015 (Qblade) 3 Blade	445,58	665,46	759,13
NACA 0015 (Qblade) 4 Blade	348,16	569,67	615,39



Gambar 15. Grafik nilai CP turbin

Tabel 5. Nilai daya turbin

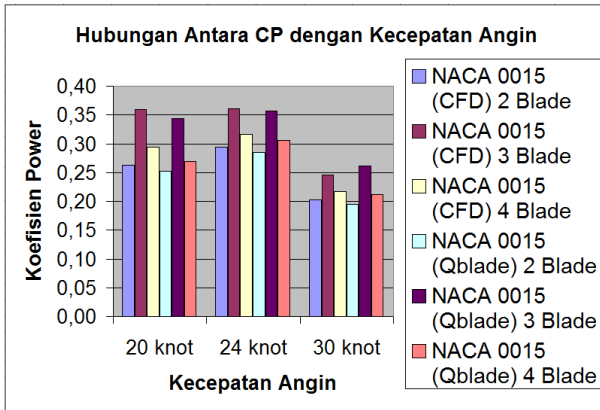
Foil	2	3	4
NACA 0011 (CFD)	3422,23	4561,36	3896,16
NACA 0015 (CFD)	4393,69	5390,86	4739,15
NACA 0019 (CFD)	3753,70	4891,39	4221,69
NACA 0011 (Qblade)	3259,15	4231,81	3726,03
NACA 0015 (Qblade)	4266,23	5343,63	4574,49
NACA 0019 (Qblade)	3525,51	4824,38	4019,32



Gambar 17. Grafik nilai torsi turbin

Tabel 7. Nilai CP turbin

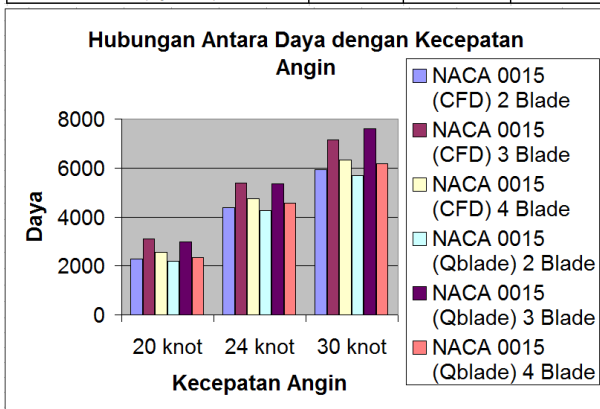
Foil	20 knot	24 knot	30 knot
NACA 0015 (CFD) 2 Blade	0,2624	0,2936	0,2028
NACA 0015 (CFD) 3 Blade	0,3589	0,3603	0,2454
NACA 0015 (CFD) 4 Blade	0,2947	0,3167	0,2166
NACA 0015 (Qblade) 2 Blade	0,2526	0,2851	0,1952
NACA 0015 (Qblade) 3 Blade	0,3444	0,3571	0,2609
NACA 0015 (Qblade) 4 Blade	0,2691	0,3057	0,2115



Gambar 18. Grafik nilai CP turbin

Tabel 8. Nilai Daya Turbin

Foil	20 knot	24 knot	30 knot
NACA 0015 (CFD) 2 Blade	2270,99	4393,69	5919,51
NACA 0015 (CFD) 3 Blade	3106,70	5390,86	7161,02
NACA 0015 (CFD) 4 Blade	2550,90	4739,15	6320,50
NACA 0015 (Qblade) 2 Blade	2186,38	4266,23	5696,70
NACA 0015 (Qblade) 3 Blade	2980,95	5343,63	7614,09
NACA 0015 (Qblade) 4 Blade	2329,20	4574,49	6172,4



Gambar 19. Grafik nilai daya turbin

4.5 Pengaruh Instalasi Turbin Pada Kapal

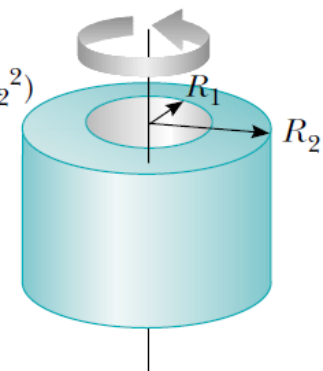
Inersia atau kelembaman adalah kecenderungan semua benda fisik untuk menolak perubahan terhadap keadaan geraknya. Secara numerik, ini diwakili oleh massa benda tersebut. Prinsip inersia adalah salah satu dasar dari fisika

klasik yang digunakan untuk memerikan gerakan benda dan pengaruh gaya yang dikenakan terhadap benda itu. Kata inersia berasal dari kata bahasa Latin, "iners", yang berarti lembam, atau malas. Isaac Newton mendefinisikan inersia sebagai: "vis insita", atau gaya dalam materi, adalah daya untuk menahan, yang dengannya setiap benda berusaha untuk mempertahankan keadaannya saat itu, apakah diam, atau bergerak beraturan ke depan dalam garis lurus.

Dalam pemakaian umum orang juga dapat menggunakan istilah "inersia" untuk mengacu kepada "jumlah tahanan terhadap perubahan kecepatan" (yang dikuantifikasi sebagai massa), atau kadang-kadang juga terhadap momentumnya, tergantung terhadap konteks. Istilah "inersia" lebih baik dipahami sebagai istilah yang lebih pendek untuk "prinsip inersia" seperti yang dideskripsikan oleh Newton dalam hukum I Newton. Hukum ini, dinyatakan dengan singkat, mengatakan bahwa sebuah benda yang tidak dikenakan oleh gaya luar (gaya netto sama dengan nol) bergerak dengan kecepatan tetap. Dalam kata-kata yang lebih sederhana, suatu benda akan terus bergerak pada kecepatannya saat ini tanpa berubah arah, hingga ada gaya yang menyebabkannya mengubah kecepatan atau arahnya. Ini juga termasuk benda yang tidak bergerak (kecepatan = nol), yang akan tetap dalam keadaan diam sampai ada gaya yang menyebabkannya bergerak.

Hollow cylinder

$$I_{CM} = \frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$$



Gambar 20. Hollow Cylinder [10]

Rumusan :

$$I_{CM} = \frac{1}{2} M (R_1^2 + R_2^2) \quad (4)$$

- M = Massa objek yang berotasi
- R₁ = Jari-jari dalam
- R₂ = Jari-jari luar

$$\begin{aligned}
 V_{blade} &= (2xL_{ALAS} + L_{SELIMUT}) \times \text{Tebal} \\
 &= (2x0,1246 + 2,2220x3,243) \times 0,001 \\
 &= 0,0075 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Diketahui :

$$\begin{aligned}
 M &= (\text{Volume blade} \times \rho_{aluminium}) \times 3 \\
 &= (0,0075 \text{ m}^3 \times 2700 \text{ kg/m}^3) \times 3 \\
 &= (20,25 \text{ kg}) \times 3 \\
 &= 60,75 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \text{Jari-jari dalam} \\
 &= \text{Jari-jari turbin} - (\frac{1}{2} \times 15\% \times c) \\
 &= 2 \text{ m} - (1/2 \times 0,15 \times 1,08 \text{ m}) \\
 &= 1,919 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \text{Jari-jari luar} \\
 &= \text{Jari-jari turbin} + (\frac{1}{2} \times 15\% \times c) \\
 &= 2 \text{ m} + (1/2 \times 0,15 \times 1,08 \text{ m}) \\
 &= 2,081 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jawab :

$$\begin{aligned}
 I_{CM} &= \frac{1}{2} M (R_1^2 + R_2^2) \\
 &= \frac{1}{2} 60,75 \text{ kg} \times (1,919^2 \text{ m} + 2,081^2 \text{ m}) \\
 &= 243,30 \text{ kgm} = 0,24 \text{ ton.m}
 \end{aligned}$$

Diketahui :

$$MTc = 13,097 \text{ ton.m}$$

$$I_{CM} = 0,24 \text{ ton.m}$$

MTc (*moment to change trim one centimeter*) merupakan momen yang diperlukan untuk mengadakan trim sebesar 1 cm. *RM* (*righting moment*) *at 1 degree* merupakan besarnya momen yang mempengaruhi heeling kapal sebesar 1 derajat. Menggunakan *software Maxsurf Modeler Advance version 21.0.3.74* didapatkan *MTc* sebesar 13,097 ton.m dan *RM at 1 deg* sebesar 32,325 ton.m.

Measurement	Value	Units
1 Displacement	316,0	t
2 Volume (displaced)	308,341	m³
3 Draft Amidships	1,215	m
4 Immersed depth	1,215	m
5 WL Length	53,390	m
6 Beam max extents on	7,898	m
7 Wetted Area	405,773	m²
8 Max sect. area	7,515	m²
9 Waterpl. Area	354,807	m²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0,768	
11 Block coeff. (Cb)	0,602	
12 Max Sect. area coeff.	0,783	
13 Waterpl. area coeff. (C)	0,841	
14 LCB length	-8,101	from ze
15 LCF length	-6,274	from ze
16 LCB %	-15,173	from ze
17 LCF %	-11,751	from ze
18 KB	0,736	m
19 KG fluid	0,000	m
20 BMT	5,124	m
21 BML	220,504	m
22 GMT corrected	5,860	m
23 GML	221,240	m
24 KMT	5,860	m
25 KML	221,240	m
26 Immersion (TPc)	3,637	tonne/c
27 MTc	13,097	tonne.m
28 RM at 1deg = GMT.Dis	32,325	tonne.m

Gambar 21. *MTc* dan *RM at 1 deg* pada maxsurf

Diketahui :

$$MTc = 13,097 \text{ ton.m}$$

$$I_{CM} = 0,24 \text{ ton.m}$$

$$\text{Rumusan : } \Delta_{TRIM} = \frac{I_{CM}}{MTc} \times 1 \text{ cm} \quad (5)$$

$$\text{Jawab : } \Delta_{TRIM} = \frac{0,24}{13,097} \times 1 \text{ cm}$$

$$\Delta_{TRIM} = 0,018 \text{ cm} = 0,18 \text{ mm}$$

Diketahui :

$$RM \text{ at } 1 \text{ deg} = 32,325 \text{ ton.m}$$

$$I_{CM} = 0,24 \text{ ton.m}$$

$$\text{Rumusan : } \Delta_{deg} = \frac{I_{CM}}{RM \text{ at } 1 \text{ deg}} \times 1 \text{ deg} \quad (6)$$

$$\text{Jawab : } \Delta_{deg} = \frac{0,24}{32,325} \times 1 \text{ deg}$$

$$\Delta_{deg} = 0,007 \text{ deg}$$

Tabel 9. Nilai trim dan *heeling* kapal

BLADE	TRIM (mm)	HEELING (derajat)
NACA 0011 2 SUDU	0,18	0,007
NACA 0011 3 SUDU	0,18	0,007
NACA 0011 4 SUDU	0,18	0,007
NACA 0015 2 SUDU	0,19	0,008
NACA 0015 3 SUDU	0,18	0,007
NACA 0015 4 SUDU	0,18	0,007
NACA 0015 2 SUDU	0,19	0,008
NACA 0015 3 SUDU	0,19	0,008
NACA 0015 4 SUDU	0,18	0,007

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil analisa yang telah dilakukan pada setiap variasi pada wind turbine dengan profil sudu NACA 0011, NACA 0015 dan NACA 0019 dan jumlah sudu 2, 3 dan 4, dapat ditarik kesimpulan yaitu nilai torsi, koefisien power dan daya tertinggi adalah pada turbin dengan sudu NACA 0015, berturut-turut adalah 759,13 Nm, 0,3603 dan 7,6 KW yang dapat digunakan sebagai tambahan daya listrik untuk menyalakan *air conditioner* pada ruang navigasi kapal dan turbin angin yang paling efektif untuk dipasang di FIV 594 GT adalah turbin angin dengan *airfoil* NACA 0015 berjumlah tiga blade dengan ukuran diameter 4 meter dan panjang blade 3,243 meter serta momen inersia dari instalasi turbin angin tidak memberikan pengaruh terhadap stabilitas dan olah gerak kapal.

Dari hasil pengerjaan tugas akhir saran yang dapat penulis berikan yaitu sebaiknya dilakukan penelitian pada jenis foil yang digunakan pada sudu selain foil NACA dan sebaiknya dilakukan pengujian secara eksperimen untuk membandingkan hasil simulasi dengan CFD.

Daftar Pustaka

- [1] Tae Lee, Young. 2015. Numerical Study of The Aerodynamic Performance of a 500 W Darrieus Type Vertical Axis Wind Turbine. South Korea. Pusan National University.
- [2] Bianchini, Alessandro. 2014. Design Guidelines for H-Darrieus Wind Turbines: Optimization of the Annual Energy Yield. Italy. University of Florence.
- [3] Buchner, A-J. 2015, Dynamic Stall in Vertical Axis Wind Turbines: Comparing Experiments and Computations. United States. Princeton University.
- [4] Huda, Saiful & Arief, Irfan Syarif, 2014. Analisa Bentuk Profile dan Jumlah Blade Vertical Axis Wind Turbine Terhadap Putaran Rotor untuk Menghasilkan Energi Listrik. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh November.
- [5] Jin, Xin. 2014. Darrieus Vertical Axis Wind Turbine : Basic Research Methods. China. Chongqing University.
- [6] Kaprawi. 2011. Pengaruh Geometri Sudu dari Turbin Air Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh November.
- [7] Li, Qing'an. 2015. Effect of Number of Blades on Aerodynamic Force on a Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine. Japan. Mie University.
- [8] Mohamed, M.H. 2014. CFD Analysis for H-rotor Darrieus Turbine as a Low Speed Wind Energy Converter. Egypt. Helwan University.
- [9] Siddiqui, M.Salman. 2014. Quantification of the Effects of Geometric Approximations on the Performance of a Vertical Axis Wind Turbine. Pakistan. National University of Sciences & Technology.
- [10] Halliday, David & Resnick, Robert, 2013. Rotation of a Rigid Object About a Fixed Axis. United States of America. University of Pittsburgh.