

Analisis Performa Propeller Wageningen Dengan Variasi Sudut Rake Terhadap Karakteristik Hidrodinamika Dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic

Owens Rivai Aan S. Saragi Napitu^{*1}, Ari Wibowo^{1*} Veryawan Nanda Perkasa^{2*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: owensrivai@email.com

Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada transportasi laut, di mana kapal tunda (*tugboat*) memegang peranan krusial yang membutuhkan kemampuan gaya dorong (*thrust*) yang stabil. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan variasi sudut *Rake* terhadap karakteristik hidrodinamika dan performa propulsi pada baling-baling kapal tipe *Wageningen B-Series*. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental kuantitatif berbasis simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan pendekatan *Finite Volume Method (FVM)* adalah cara menghitung simulasi komputer dengan membagi sebuah benda menjadi kotak-kotak kecil untuk melihat aliran didalamnya. Objek yang diteliti memiliki diameter 1905 mm dengan variasi sudut *Rake* sebesar 5°, 10°, dan 15° pada kecepatan putar konstan 260 rpm. Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model eksisting terhadap perhitungan manual *open water test* metode pengujian untuk mengetahui performa murni *propeller* tanpa adanya pengaruh dari badan kapal. Hasil validasi menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan nilai error hanya sebesar 0,16% untuk *thrust* (48.518,3 N) dan 0,47% untuk *torque* (13.148,3 Nm). Melalui pemodelan ini, kontur distribusi tekanan dan pola aliran turbulen disekitar permukaan daun baling-baling dapat divisualisasikan secara akurat untuk menganalisis performa propulsi terbaik.

Kata kunci: *Propeller Wageningen B-Series*, Sudut Rake, Computational Fluid Dynamics (CFD), Thrust, Torque.

Abstract

As an archipelagic nation, Indonesia relies heavily on maritime transportation, in which tugboats play a crucial role that requires stable thrust capabilities. This study aims to analyze the effect of changes in the rake angle on the hydrodynamic characteristics and propulsion performance of Wageningen B-Series ship propellers. The research method used is quantitative experimental analysis based on Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulation using the Finite Volume Method (FVM) is a method of performing computer simulations by dividing an object into small cubes to observe the flow within. The object under study has a diameter of 1905 mm with rake angle variations of 5°, 10°, and 15° at a constant rotational speed of 260 rpm. Numerical model validation was performed by comparing the simulation results of the existing model with manual calculations from open-water tests a testing method to determine the propeller's pure performance without any influence from the ship's hull. The validation results showed a very high level of accuracy with an error of only 0.16% for thrust (48,518.3 N) and 0.47% for torque (13,148.3 Nm). Through this modeling, the pressure distribution contours and turbulent flow patterns around the propeller blade surfaces can be accurately visualized to analyze optimal propulsion performance.

Keywords: *Propeller Wageningen B-Series*, Sudut Rake, Computational Fluid Dynamics (CFD), Thrust, Torque.

1 Pendahuluan

Indonesia sebagai negara kepulauan yang menjadikan aktivitas maritim yang sangat padat menyebabkan sektor transportasi laut sangat krusial sebagai jalur perekonomian nasional. Dalam operasional dilautan kapal kecil tunda (*tugboat*) sangat memegang peranan penting dan krusial, khususnya digunakan untuk memandu kapal besar serta melakukan pengoperasian penarikan tongkang (*barge*), yang dimana kapal *tugboat* diwajibkan memiliki performa hidrodinamika yang bagus dan handal, fokus utama pada kapal *tugboat* bukanlah kecepatan melainkan kemampuan menghasilkan gaya dorong yang stabil saat dalam pengoperasian.

Salah satu komponen yang sangat krusial pada kapal adalah sistem *propulsi*, penggerak utama sebegini besar tipe kapal biasanya menggunakan *propeller* [1]. Perencanaan sistem *propulsi* sangat penting karena perencanaan sistem *propulsi* guna mendesain *propeller* dimana *propeller* yang didesain harus menghasilkan kecepatan kapal yang sesuai dengan fungsi kapal tersebut. Gaya dorong (*thrust*) yang diinginkan tidak terlepas dari desain *propeller* yang baik [2]. Prinsip kerja dari alat *propulsi* baling-baling adalah gaya dorong pada kapal yang berputar didalam air dengan digerakkan oleh mesin sehingga mendapatkan gaya angkat atau *lifting force* yang bekerja pada daun baling-baling [3].

Propeller memiliki variabel koefisien yang mempengaruhi karakteristik performanya seperti jumlah daun/(Z) berpengaruh pada getaran, kebisingan serta efek kavitasi, umumnya kapal besar menggunakan *propeller* dengan empat hingga lima daun untuk menjaga *thrust* optimal serta kontrol terhadap getaran, pada kapal dengan kebutuhan tingkat kebisingan rendah, *propeller* dengan lebih dari lima daun menjadi solusi untuk mengurangi resiko kavitasi maupun noise akustik bawah laut [4].

Untuk menjawab permasalahan itu dapat dilakukan modifikasi geometris pada daun baling-baling kapal (*propeller*) menjadi salah satu fokus pada penelitian ini, salah satu yang menjadi parameter *design* yang efektif yaitu penerapan sudut *rake*. *Rake* adalah kemiringan daun baling-baling terhadap garis tegak lurus poros. Untuk meningkatkan gaya angkat haluan (*bow lift*) dan meningkatkan efisiensi dorongan. Sudut *Rake* merupakan elemen penting dalam desain *propeller*.

Meskipun pemberian *Rake* dapat membuat keuntungan yang sangat signifikan terhadap sistem propulsi namun penentuan sudut yang optimal merupakan tantangan yang sangat krusial, terlalu besar sudut *Rake* dapat mengakibatkan masalah kekuatan struktur pada ujung daun (*blade tip*) *propeller*. Metode *analisis Computational Fluid Dynamics* (CFD) dapat mensimulasikan interaksi antara fluida dan *propeller*, sehingga dapat mensimulasikan analisis sudut *Rake* sebelum dilakukan nya fabrikasi sehingga dapat mengetahui sudut *rake* yang optimal.

Dalam perencanaan *propeller* metode yang kerap digunakan adalah grafik *open water test* untuk mengetahui nilai torsi, *thrust* serta efisiensi sebuah *propeller*. Namun perkembangan teknologi menghasilkan suatu pengembangan aplikasi pemodelan numerik berbasis CFD yang kini banyak digunakan untuk mengoptimalkan desain *propeller* secara akurat [4]. Penelitian Nasiri pada 2023 menyatakan perubahan konfigurasi tip-rake secara strategis dapat meningkatkan performa hingga 1% dalam simulasi numerik [5].

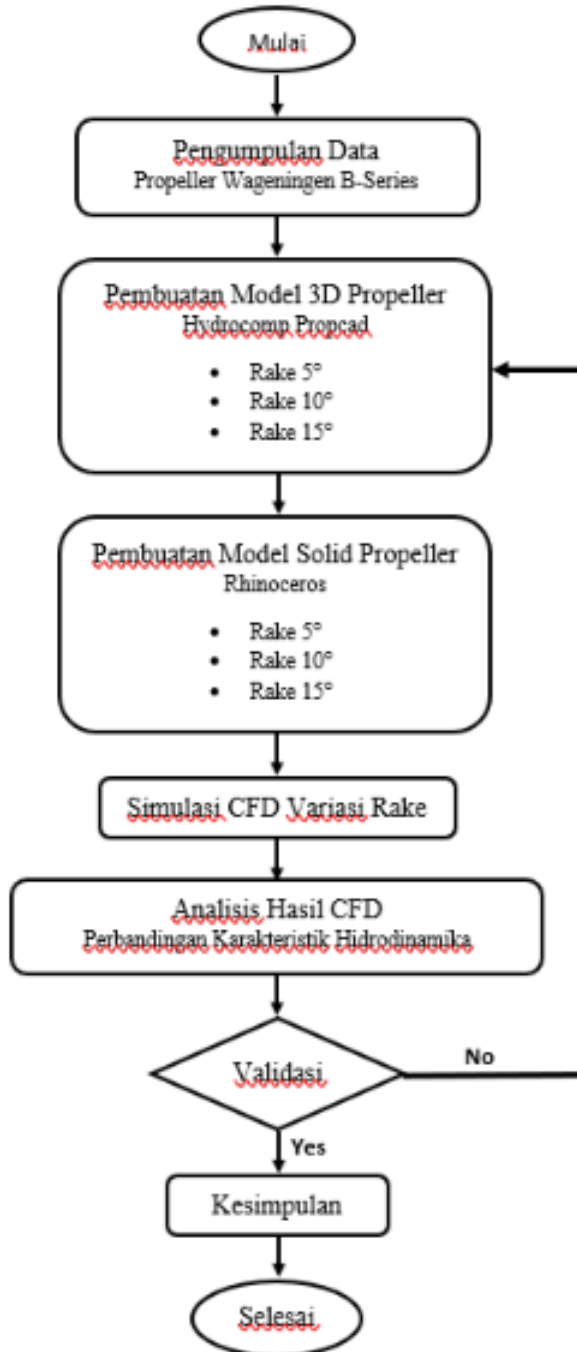
Penelitian ini hanya berfokus pada analisis pengaruh perubahan sudut *Rake* terhadap karakteristik *propeller* tipe *Wageningen B-Series*. Penentuan nilai sudut yang optimal menjadi fokus utama karena perubahan geometri ini secara langsung akan memengaruhi distribusi tekanan pada permukaan daun *propeller*. Melalui analisis ini diharapkan dapat mengetahui hasil dari besaran sudut *rake* yang paling ideal untuk meningkatkan efisiensi performa propulsi pada operasional kapal.

Untuk menjaga fokus pada penelitian ini maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut objek penelitian terbatas pada baling-baling seri *Wageningen* dengan diameter 1905 mm. Variasi yang dianalisis difokuskan pada perubahan sudut *rake* 5°, 10° dan 15° dengan nProp yang digunakan 260 rpm dengan parameter *pitch ratio* yang tetap, simulasi digunakan menggunakan *software SolidWorks Simulation* dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

Pemilihan variasi sudut *rake* 5°, 10°, dan 15° pada penelitian ini merujuk pada standar klasifikasi. Bureau Veritas (BV) Rules NR467 Part C, Chapter 1, Section 8 (*Propellers*) [6]. Berdasarkan regulasi tersebut, pembatasan sudut *rake* maksimal pada angka 15° sebagai standard design *Wageningen B-Series* bertujuan untuk mengontrol besarnya tegangan tekuk tambahan akibat gaya sentrifugal (*centrifugal bending stress*) pada area pangkal daun (*blade root*). Pengujian *step-down* ke sudut 10° dan 5° dilakukan untuk mengevaluasi potensi peningkatan gaya dorong (*thrust*) pada kapal *tugboat* dengan tetap menjamin bahwa kekuatan material *Manganese Bronze* yang digunakan berada dalam batas tegangan izin (*allowable stress*) serta memenuhi yang disyaratkan oleh *class*.

2 Metodologi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental berbasis simulasi numerik menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* pada *propeller Wageningen B-Series*. Tujuannya adalah untuk menganalisis pengaruh sudut *Rake* terhadap torsi 260 rpm. Fokus utama pada penelitian ini adalah untuk melihat evaluasi performa *propeller*. Diagram alir pada metode penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1: Diagram Alir

Pada penelitian ini terdapat tiga jenis variabel, variabel bebas adalah variasi ukuran sudut *rake propeller* yang berbeda 5°, 10° dan 15°, dengan kecepatan yaitu 260 rpm. Perbedaan pada parameter sudut *rake* bertujuan untuk melihat pengaruh terhadap variabel terikat yaitu karakteristik hidrodinamika, sementara itu parameter variabel kontrol atau parameter yang dijaga selama penelitian ini meliputi *geometri propeller Wageningen B-Series*, *diameter*, *nilai pitch ratio*, *software* yang digunakan dalam proses *design* dan *simulation* dan jenis kapal yang digunakan yaitu tugboat dengan panjang 26 m.

2.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan *propeller Wagneningen B-Series* untuk disimulasikan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic CFD*, jenis *propeller* ini adalah baling-baling tetap (*fixed pitch*). *Propeller* ini mempunyai *section* dan karakteristik kinerja yang baik pada saat beroperasi didalam air. Data pada penelitian ini menggunakan jenis *propeller Wagneningen B-Series* dengan sudut *Rake* yang berbeda, dimensi dari *propeller* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1
Dimensi *Propeller*

No	<i>Propeller Summary</i>	<i>Information</i>
1	<i>Diameter</i>	1905 mm
2	<i>Pitch</i>	1600 mm
3	<i>Number of Blade</i>	4
4	<i>Blade Section</i>	<i>B-Series</i>
5	<i>Skew angle</i>	21°
6	<i>Expanded area ratio</i>	0,7
7	<i>Thickness Rule</i>	BV Rules
8	<i>Material</i>	<i>Magnesium Bronze</i>

Baling-baling yang diteliti pada pengujian ini memiliki empat bilah dengan variasi *Rake* yang berbeda dengan diuji pada nProp yaitu 260 rpm pada setiap *propeller*. Mesin yang digunakan yaitu MITSUBISHI S6R2-MTK3 dapat dilihat pada Gambar 2, dengan *Specification* mesin dapat dilihat pada Tabel 2.



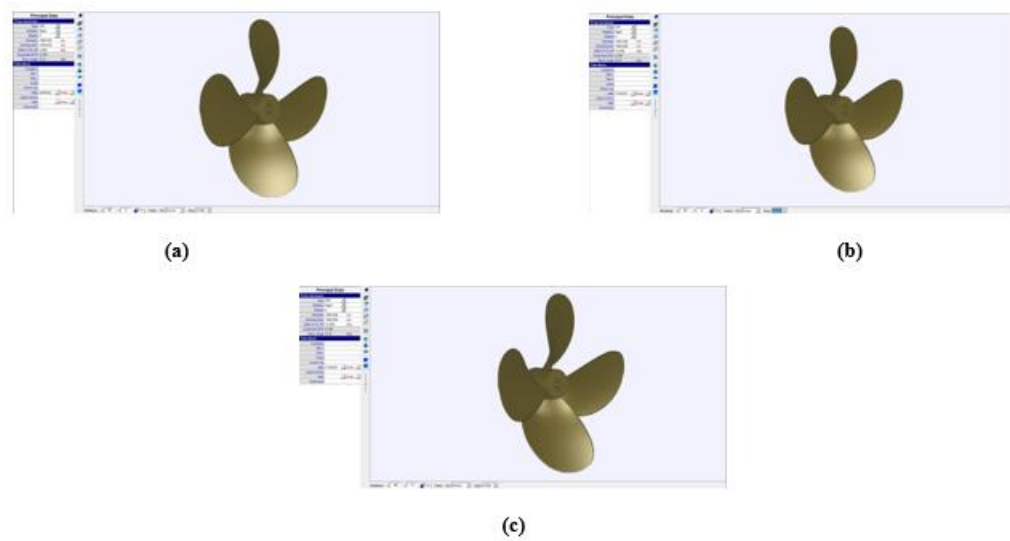
Gambar 2: MITSUBISHI S6R2-MTK3

Tabel 2
***Specification* mesin**

No	<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1	<i>Dimension - L x W x H</i>	2105 x 1183 x 1695	mm
2	<i>Dry Weight</i>	3130	kg
3	<i>Engine speed</i>	1406	rpm
4	<i>Output</i>	759	kw
5	<i>Cylinder Configuration</i>	6	-
6	<i>Emissions</i>	Tier II	-
7	<i>Design Shaft</i>	260	rpm
8	<i>Speed</i>	10	knots

2.2 Pembuatan Model *Propeller (Hydrocomp Propcad)*

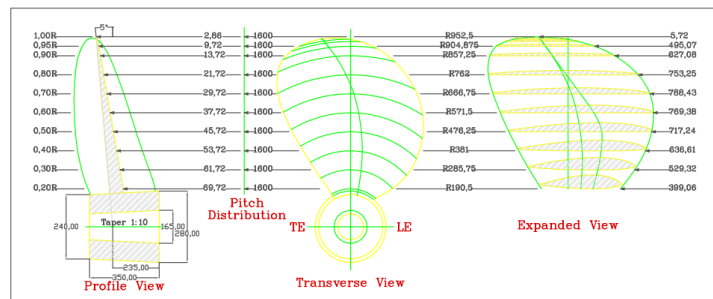
Pada pembuatan model desain 3D *Propeller* merupakan tahapan awal dalam proses simulasi numerik untuk mengevaluasi pengaruh sudut *Rake* 5°, 10° dan 15° terhadap hidrodinamika. Untuk menghasilkan geometris yang presisi pada tahapan desain *propeller*, yaitu menggunakan *software Hydrocomp Propcad* dengan acuan data yang tertera pada tabel 1. Hasil 3D desain *propeller* dengan sudut *Rake* yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 3.



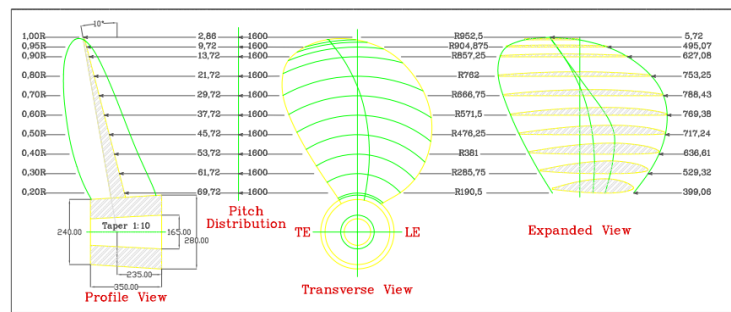
Gambar 3: Desain *Propeller* Propcad dengan variasi sudut Rake (a) 5°, (b) 10° dan (c) 15°

2.2.1 Sketch 2D *Propeller*

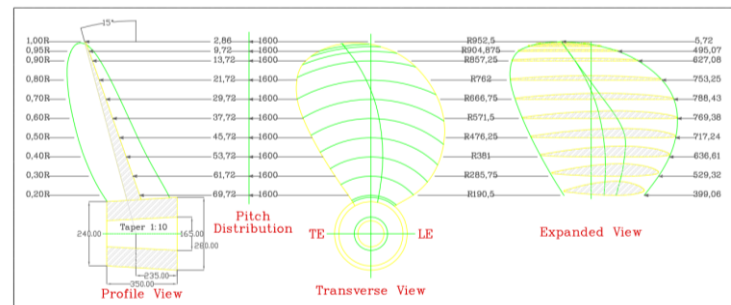
Model *propeller* ini memiliki konfigurasi empat buah bilah (*four blades*) dengan parameter utama seperti diameter dan *pitch* yang mengacu pada data teknis ditabel 1. Dalam proses ini, aspek geometri yang menjadi fokus utama adalah variasi sudut *rake* sebesar 5°, 10°, dan 15°. Dalam mengidentifikasi karakteristik geometrinya, visualisasi model dilihat dari beberapa sudut pandang. *Profile View* (tampak samping) adalah bentuk baling-baling jika dilihat dari sisi samping. *Pitch Distribution* adalah bagian yang menunjukkan kekuatan dorong teoretis dari setiap tingkatan daun baling-baling saat berputar satu putaran penuh. *Transverse View* (tampak depan) adalah sudut pandang yang memperlihatkan bentuk baling-baling secara lurus dari arah depan atau belakang. *Expanded View* (tampak bentangan) adalah tampak daun *propeller* yang digambar dalam kondisi dibuat rata atau dibentangkan. LE (*leading edge*) adalah tepi depan daun yang pertama kali memotong atau menabrak air saat kapal melaju ke depan. TE (*trailing edge*) adalah tepi belakang daun tempat air mengalir keluar setelah memberikan gaya dorong pada kapal. Hasil dari transformasi sketsa 2D menjadi pemodelan tiga dimensi berbasis CAD yang dapat dilihat pada gambar 4, yang menunjukkan visualisasi geometri tiap variasi secara mendalam.



(a)



(b)

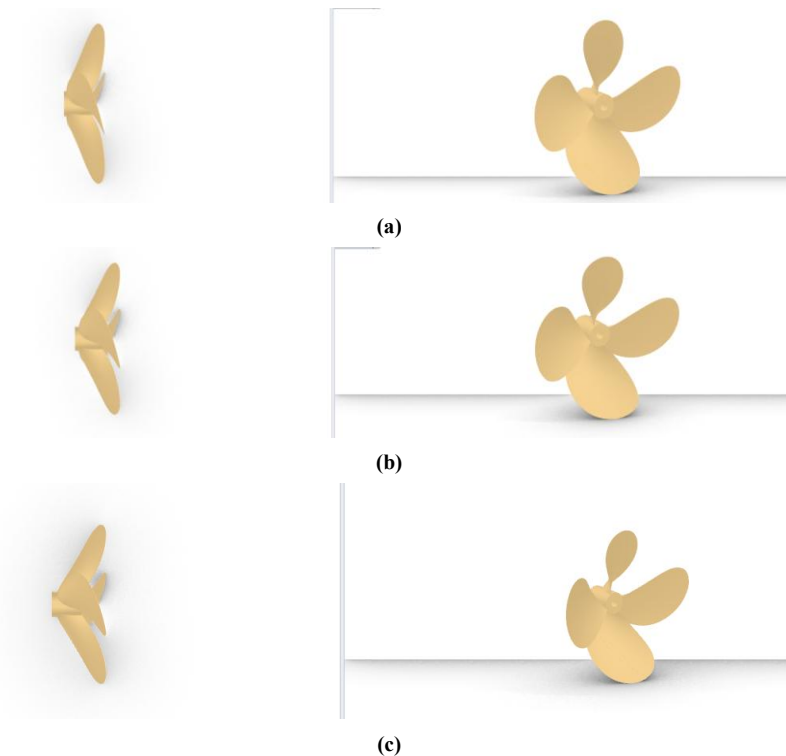


(c)

Gambar 4: Sketch 2D Propeller (a) 5°, (b) 10° dan (c) 15°.

2.3 Pembuatan Model *Solid Propeller*

Setelah tahapan desain menggunakan *software Hydrocomp Propcad*, tidak dapat langsung diexport ke *software* analisis dikarenakan format desain *Hydrocomp Propcad* yang berbentuk *surface*. Sehingga pada tahap selanjutnya diexport ke *software* Rhinoceros untuk mengubah *surface* menjadi *solid* agar bisa dianalisa pada *software* CFD dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5: Desain Solid Propeller (a) 5°, (b) 10° dan (c) 15°

2.4 Simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD)

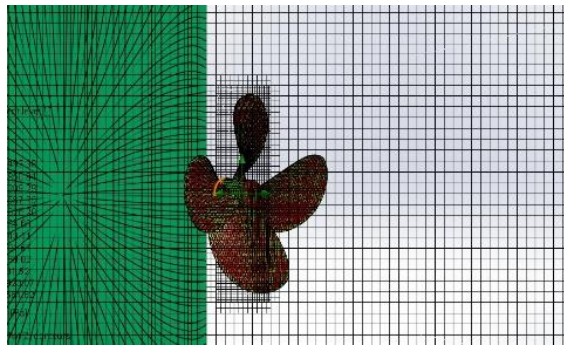
Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) adalah metode numerik yang digunakan untuk menganalisis dan mem-visualisasikan aliran fluida dan interaksinya dengan permukaan padat melalui komputer. CFD biasanya digunakan untuk memecahkan masalah aliran fluida yang rumit dan biasanya digunakan secara luas diberbagai bidang teknik. Penelitian ini menggunakan CFD dengan pendekatan menggunakan metode FVM (*Finite Volume Method*) yang dimana FVM digunakan untuk menyelesaikan persamaan konsevasi fluida dengan membaginya kedalam volume-volume kecil. Adapun proses dan result singkatnya sebagai berikut.

2.4.1 Proses Geometri

Proses ini merupakan tahap pemodelan *geometri* 3D dan 2D dari objek yang akan dianalisis dibuat menggunakan *software HydroComp PropCad*.

2.4.2 Proses Meshing

Proses ini merupakan tahap dimana domain *fluida* dan *geometri* objek menjadi elemen-elemen kecil yang biasa disebut *mesh* atau *grid*. guna menjaga kestabilan konvergensi serta menangkap gradien tekanan (*pressure gradient*) yang kompleks disekitar permukaan baling-baling, diterapkan teknik perapatan jaring lokal (*local mesh refinement*) yang dapat dilihat pada Gambar 6, berdasarkan hasil kalkulasi pembuat grid digunakan sebanyak 334.516 sel.



Gambar 6: Proses Meshing Propeller Existing.

2.4.3 Proses Setup

Pada proses ini merupakan tahap konfigurasi parameter simulasi yang dimana menentukan jenis fluida yang akan ditentukan, serta kecepatan putar *propeller*.

2.4.4 Hasil Proses Simulasi Thrust dan Torque Propeller Wageningen Existing

Dari hasil pemodelan dan simulasi CFD yang dilakukan pada model *Existing propeller Wageningen* sesuai data *propeller profile* dihasilkan *result* pada Gambar 7, untuk melihat arah aliran dari perputaran *propeller* dapat dilihat pada Gambar 8. Dari hasil simulasi pada *propeller existing rotation right* didapatkan nilai *thrust* sebesar 48518.3 N, dan nilai *torque* sebesar 13148.3 Nm.

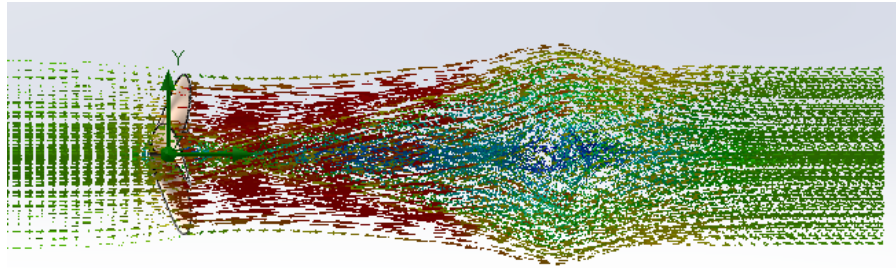
Name	Current Value	Comment	Averaged Value
 Force	-47550.7 N	Checking criteria	-48518.3 N
 Torque	12934.8 N*m	Checking criteria	13148.3 N*m

(a)

Name	Current Value	Comment	Averaged Value
 Force	-48386.7 N	Checking criteria	-49098.7 N
 Torque	13083.6 N*m	Checking criteria	13227 N*m

(b)

Gambar 7: Result simulasi Propeller Wageningen Existing (a) Rotation Right (b) Rotation Left



Gambar 8: Flow simulasi *Propeller Wageningen Existing*

2.5 Validasi

Setelah proses simulasi dilakukan dan mendapatkan hasil simulasi maka selanjutnya melakukan validasi *thrust* dan *torque* antara hasil simulasi dan perhitungan manual pada *propeller existing rotation right* dengan acuan grafik $KT - KQ - J$ diagram tipe *Wageningen B-Series*, dengan data kapal yang memiliki V_s sebesar 10 knots atau 5.144 m/s dengan C_b sebesar 0.52. Rumus yang digunakan dapat dilihat pada persamaan berikut ini yang mengacu pada sumber ITTC (*International Towing Tank Conference*) pada *Open water test*.

Langkah pertama yaitu mencari nilai *wake friction* didapatkan nilai *wake friction* sebesar 0,21 dengan menggunakan persamaan 1.

$$w = 0,5 C_b - 0,05 \quad (1)$$

Keterangan:

C_b = *Coefficient Block*

Setelah mendapatkan nilai dari *wake friction* selanjut nya mencari nilai dari *velocity of advance* (V_a) dari model *propeller existing* sebesar 4,064 m/s menggunakan persamaan 2.

$$V_a = (1-w) \times V_s \quad (2)$$

Keterangan:

V_a = *Velocity of advance* (m/s)

W = *Wake friction*

V_s = *Ship speed* (m/s)

Selanjut nya mencari nilai *koefisien advance propeller* (J) untuk menyamakan kondisi kecepatan aliran air V_a dengan kecepatan putar baling-baling n . nilai (J) inilah yang di gunakan sebagai dasar acuan untuk mencari nilai koefisien gaya dorong (KT) dan koefisien torsi (KQ) pada kurva karakteristik *Wageningen B-Series*, sehingga perhitungan validasi manual ini bisa diselesaikan dan dibandingkan dengan hasil simulasi CFD, dengan persamaan 3 didapat nilai (J) sebesar 0,493.

$$J = V_a / n \times D \quad (3)$$

Keterangan:

V_a = *Velocity of advance* (m/s)

n = *Rotating propeller* (rps)

D = *Diameter propeller* (m)

Maka tahapan berikut nya dapat mencari perhitungan manual terhadap nilai *thrust* pada *propeller existing*, dengan persamaan 4 untuk mencari nilai *thrust* didapat nilai nya sebesar 48595,9 N.

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

Keterangan:

KT = Koefisien gaya dorong *propeller*

ρ = *Fluid density* (kg/m³)

n = *Rotating propeller* (rps)

D = *Diameter propeller* (m)

Sesudah mendapat nilai *thrust* maka selanjut nya mencari nilai *torque* pada *propeller existing*, dengan persamaan 5 di dapat nilai *torque* sebesar 13211.3 Nm.

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

Keterangan:

KQ = Koefisien torsi propeller

ρ = Fluid density (kg/m³)

n = Rotating propeller (rps)

D = Diameter propeller (m)

Hasil perhitungan manual gaya dorong (*thrust*) dan torsi (*torque*) pada *propeller* eksisting kemudian divalidasi menggunakan hasil simulasi perangkat lunak *SolidWorks*, sebagaimana tersaji pada tabel 3. Berdasarkan perbandingan tersebut, diperoleh nilai selisih (*error*) sebesar 0,16% untuk *thrust* dan 0,47% untuk *torque*. Hasil validasi ini dinyatakan sangat baik dan valid karena nilai selisih yang diperoleh berada jauh dibawah ambang batas toleransi maksimum yaitu sebesar 5%.

Tabel 3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan Manual Terhadap Model Propeller Existing

Variabel	Simulasi CFD	Perhitungan Manual	Error
Thrust (N)	48518.3	48595.9	0.16 %
Torque (Nm)	13148.3	13211.3	0.47 %

3 Analisis Data dan Pembahasan

Setelah dilakukan validasi pada Tabel 3 dapat disimpulkan nilai error antara hasil simulasi CFD dan hasil perhitungan manual sangat kecil, sehingga model yang dibuat pada simulasi ini dianggap identik dengan *propeller existing* sesuai data. Sehingga analisis dapat dilanjutkan dengan beberapa variasi yang telah ditentukan yaitu variasi sudut *Rake* 5°, 10° dan 15°. Analisis dan pembahasan ini akan dilakukan dengan menggunakan *Solidworks Flow Simulation* CFD dengan menggunakan FVM (*Finite Volume Method*) adalah cara menghitung simulasi komputer dengan membagi sebuah benda menjadi kotak-kotak kecil untuk melihat aliran didalamnya, untuk melihat hasil dari simulasi model *propeller* dengan variasi sudut *rake* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Simulasi Propeller Variasi Sudut Rake

Angle Rake	Parameter	Value
5°	Thrust	51041,4 N
	Torsi	14297,7 Nm
10°	Thrust	48518,3 N
	Torsi	13148,3 Nm
15°	Thrust	48346,1 N
	Torsi	13173,1 Nm

Dari tabel diatas disimpulkan nilai *thrust* dan *torque* yang paling besar terdapat pada sudut rake 5° yaitu sebesar 51041.4 N untuk Thrust dan 14297.7 Nm untuk *torque*, untuk nilai *thrust* yang paling rendah sebesar 48346.1 N dengan sudut rake 15° dan untuk nilai *torque* yang paling rendah sebesar 13148.3 Nm dengan sudut rake 10°. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penurunan sudut rake hingga 5° mampu meningkatkan gaya dorong *propeller* secara signifikan. Secara hidrodinamika, kondisi ini terjadi karena orientasi daun *propeller* yang lebih tegak terhadap sumbu poros menyebabkan komponen gaya angkat (*lifting force*) lebih banyak diarahkan ke arah aksial sehingga momentum fluida yang didorong ke belakang menjadi lebih besar. Akibatnya, gaya reaksi yang diterima propeller sebagai *thrust* juga meningkat. Namun demikian, peningkatan *thrust* tersebut diikuti oleh peningkatan kebutuhan *torque* yang cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa *propeller* menerima beban hidrodinamika (*hydrodynamic loading*) yang lebih tinggi sehingga mesin memerlukan momen puntir yang lebih besar untuk mempertahankan putaran tetap pada 260 rpm. Dengan kata lain, peningkatan *thrust* tidak selalu menunjukkan performa *propeller* yang lebih baik apabila peningkatan tersebut disertai konsumsi daya yang jauh lebih besar

Sebaliknya, pada sudut rake sebesar 15°, *thrust* mengalami penurunan menjadi nilai terendah dibandingkan variasi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa rake yang terlalu besar menyebabkan sebagian gaya hidrodinamika

terdistribusi ke arah radial akibat kemiringan daun *propeller* yang semakin tinggi. Defleksi aliran tersebut mengurangi komponen gaya yang bekerja pada arah aksial sehingga kemampuan *propeller* menghasilkan gaya dorong menjadi menurun. Walaupun kebutuhan *torque* relatif lebih kecil dibandingkan rake 5°, penurunan *thrust* menyebabkan performa *propeller* secara keseluruhan menjadi kurang optimal.

Berdasarkan data kuantitatif *thrust* dan *torque* pada Tabel 4, dilakukan analisis lanjutan untuk mengevaluasi nilai efisiensi kondisi terbuka (*open water efficiency*) adalah metode pengujian untuk mengetahui performa murni *propeller* tanpa adanya pengaruh dari badan kapal. pada setiap variasi sudut rake, proses kalkulasi ini diselesaikan secara matematis menggunakan formulasi standar ITTC (*International Towing Tank Conference*) yang merujuk pada persamaan (6), maka diperoleh hasil persentase efisiensi yang dapat dilihat pada Gambar 9.

$$\eta_0 = (T \times V_a) / (2 \times \pi \times n \times Q) \quad (6)$$

Keterangan:

η_0 = *Open water efficiency*

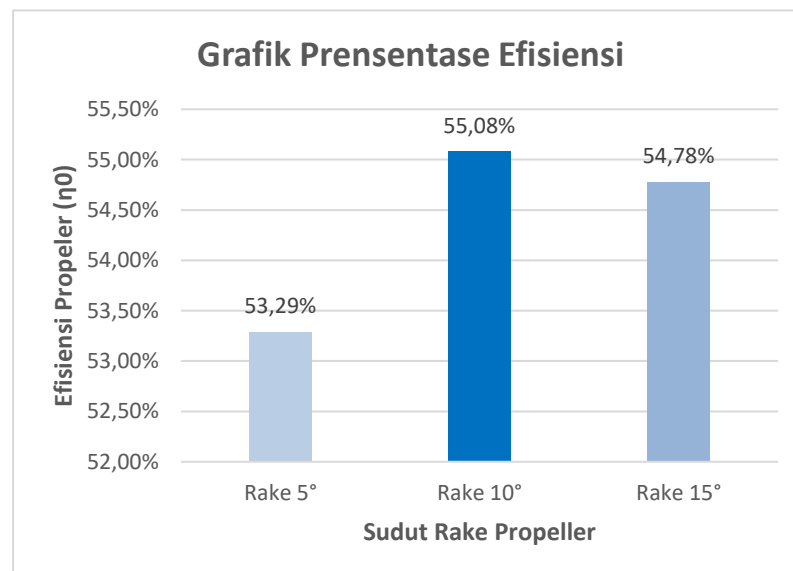
T = *Thrust* (N)

V_a = *Velocity of advance* (m/s)

π = pi (3,14)

n = *Rotating propeller* (rpm)

Q = *Torque* (Nm)



Gambar 9: Grafik Perbandingan Efisiensi Propeller

Berdasarkan grafik pada Gambar 9, dapat disimpulkan bahwa variasi sudut rake 10° menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 55,08%, sedangkan rake 15° memiliki efisiensi 54,78%, dan rake 5° menghasilkan efisiensi terendah sebesar 53,29%.

Fenomena tersebut menunjukkan adanya hubungan *trade-off* antara *thrust* dan *torque* pada desain *propeller*. Meskipun rake 5° menghasilkan gaya dorong terbesar, peningkatan *torque* yang cukup tinggi menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk memutar propeller juga meningkat sehingga efisiensi keseluruhan mengalami penurunan. Sebaliknya, rake 10° mampu menghasilkan keseimbangan yang lebih baik antara *thrust* dan *torque* sehingga konversi daya poros menjadi gaya dorong berlangsung lebih efektif. Secara kondisi optimum pada rake 10° menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada sisi tekanan *propeller* menjadi lebih merata. Distribusi tekanan yang seimbang menghasilkan pola aliran yang lebih stabil, mengurangi kehilangan energi akibat turbulensi berlebihan, serta mempertahankan arah aliran fluida tetap dominan ke arah aksial. Hal tersebut menjadikan efisiensi propeller lebih tinggi dibandingkan dua variasi lainnya.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan gaya dorong bukan merupakan satu-satunya indikator performa *propeller*. Parameter efisiensi harus dipertimbangkan karena mencerminkan kemampuan *propeller* dalam mengubah daya poros menjadi gaya dorong secara efektif. Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi CFD dan analisis efisiensi yang dilakukan, variasi sudut rake 10° merupakan konfigurasi geometri yang paling optimum untuk *propeller Wageningen B-Series* pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini. Konfigurasi tersebut mampu memberikan keseimbangan terbaik antara *thrust*, *torque*, dan efisiensi sehingga lebih sesuai untuk diaplikasikan pada kapal tugboat yang memerlukan gaya dorong tinggi dengan konsumsi daya yang tetap efisien.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pendekatan *Finite Volume Method* (FVM) serta analisis terhadap variasi sudut rake sebesar 5° , 10° , dan 15° pada *propeller Wageningen B-Series* dengan kondisi operasi tetap pada 260 rpm, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

Hasil validasi model numerik menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik, dengan nilai *error* sebesar 0,16% untuk *thrust* dan 0,47% untuk *torque* dibandingkan hasil perhitungan manual menggunakan metode *Open Water Test*. Nilai tersebut berada jauh di bawah batas toleransi sebesar 5%, sehingga model CFD dinyatakan valid dan mampu merepresentasikan karakteristik hidrodinamika *propeller* secara akurat. Variasi sudut rake memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik hidrodinamika *propeller*. Variasi rake 5° menghasilkan *thrust* tertinggi sebesar 51.041,4 N, namun juga menghasilkan kebutuhan *torque* terbesar yaitu 14.297,7 Nm. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan gaya dorong diikuti oleh meningkatnya beban hidrodinamika yang harus diatasi oleh sistem propulsi. Variasi rake 15° menghasilkan nilai *thrust* terendah sebesar 48.346,1 N dengan *torque* sebesar 13.173,1 Nm. Penurunan performa tersebut menunjukkan bahwa sudut *rake* yang terlalu besar menyebabkan distribusi gaya hidrodinamika tidak lagi dominan ke arah aksial, sehingga kemampuan *propeller* dalam menghasilkan gaya dorong menjadi berkurang.

Berdasarkan perhitungan *Open Water Efficiency* (η_o), variasi rake 10° memberikan nilai efisiensi tertinggi sebesar 55,08%, lebih tinggi dibandingkan rake 15° sebesar 54,78% dan rake 5° sebesar 53,29%. Hasil ini menunjukkan bahwa sudut *rake* 10° mampu menghasilkan keseimbangan terbaik antara *thrust* dan kebutuhan *torque*, sehingga proses konversi daya poros menjadi gaya dorong berlangsung lebih efektif. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai *thrust* tidak selalu menghasilkan performa *propeller* yang paling baik. Efisiensi propulsi ditentukan oleh keseimbangan antara gaya dorong yang dihasilkan dan daya yang dibutuhkan untuk memutar *propeller*. Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi CFD dan analisis efisiensi yang dilakukan, *propeller Wageningen B-Series* dengan sudut rake 10° merupakan konfigurasi geometri yang paling optimum karena mampu memberikan performa hidrodinamika yang paling efisien dengan kebutuhan torsi yang tetap terkendali.

Hasil penelitian ini memiliki implementasi yang dapat diterapkan pada dunia industri perkapalan, khususnya dalam proses perancangan dan optimasi sistem propulsi kapal tugboat. Berdasarkan hasil simulasi, penggunaan *propeller Wageningen B-Series* dengan sudut rake 10° memberikan keseimbangan terbaik antara *thrust*, *torque*, dan efisiensi propulsi. Penerapan konfigurasi tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan daya mesin, mengurangi beban kerja poros *propeller*, serta menekan konsumsi bahan bakar selama operasi kapal. Selain itu, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai metode evaluasi desain *propeller* sebelum proses manufaktur, sehingga dapat mengurangi biaya pembuatan prototipe, mempercepat proses pengembangan desain, serta meminimalkan risiko kegagalan performa pada saat pengoperasian kapal.

5 Daftar Pustaka

- [1] L. Pramesti, R. D. E. Witjonarko, and B. B. A. Aji, “Analisis Performa Propeller Kaplan 4-55 dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD),” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 6, no. 2, pp. 249–256, 2022.
- [2] R. N. Situmorang, P. Manik, and A. W. B. Santoso, “Analisa Nilai Thrust Optimum Propeller Pada Kapal Tugboat Pelabuhan Paket-II 2x1850HP Dengan Variasi Diameter Propeller, Jumlah Daun Propeller & Kecepatan Putaran Propeller (RPM).,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 9, no. 1, pp. 112–116, 2020.
- [3] K. C. P. Lumbanraja, D. Chrismianto, and S. Samuel, “Perhitungan Nilai Maksimum Thrust, Torque, dan Efficiency Propeller Tipe B-4 Series pada Kapal Tugboat dengan Modifikasi Diameter, Rake, dan Pitch menggunakan Metode Komputasi,” *J. Rekayasa Hijau*, vol. 5, no. 1, pp. 63–78, Apr. 2021, doi: 10.26760/jrh.v5i1.63-78.
- [4] K. B. Santoso, B. A. Aditya, H. Yudo, and M. Indriyanto, “Analisis Thrust, Torsi, dan Efisiensi Propeller B Series menggunakan Metode Design of Experiments (DOE),” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 13, no. 3, Aug. 2025, Accessed: Apr. 23, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/53282>
- [5] D. Anevlavi, S. Zafeiris, G. Papadakis, and K. Belibassakis, “Efficiency Enhancement of Marine Propellers via Reformation of Blade Tip-Rake Distribution,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/jmse11112179.
- [6] “BV Rules_NR 467_Part C_MACHINERY, ELECTRICITY, AUTOMATION AND FIRE PROTECTION_Edition 2026.”
- [7] Perkasa, Veryawan Nanda, Meschac Timothee Silalahi, Ita Wijayanti, and Hanifah Widiastuti. “Computational Fluid Dynamics Analysis of Marine Propeller Hydrodynamic Performance: A Systematic Investigation Across Extended Operational Envelopes.” In *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Engineering (ICAE 2025)*, vol. 290, edited by Hanifah Widiastuti, Tiwi Gustria Ningsih, Agung Riyadi, Abdurahman Dwijotomo, and Didi Istardi. Advances in Engineering Research. Atlantis Press International BV, 2025. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-982-7_27.
- [8] Reza, Muhammad Ali, Lilik Khoiriyah, Muhammad Fiky Izzulhaq, Intan Rahmahwati, Vena Rizky Pusparani, and Chezta Ahmad Muzakky. “An Integrated Computational Approach for Optimizing Wageningen B-Series Marine Propellers and Assessing Open Water Performance through CFD Simulation.” *WAVE: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim* 19, no. 2 (2025): 107–17. <https://doi.org/10.55981/wave.2025.13620>.