



Studi Perbandingan *Thrust* dan *Torque* pada *Toroidal Propeller* dengan *Wageningen B-Series Propeller* Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Tegar Prastyo^{1,*}, Muhammad Sawal Baital¹, Aulia Windyandari¹ dan Zulfaidah Ariany¹

¹Departemen Teknologi Industri, Fakultas Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
Article history: Diterima 6 Maret 2025 Direvisi 10 Juni 2025 Accepted June 16, 2025	Propeller berperan penting dalam sistem propulsi kapal, memengaruhi kecepatan dan efisiensi transportasi laut. <i>Wageningen B-Series Propeller</i> menjadi standar dalam analisis hidrodinamis, sementara <i>Toroidal Propeller</i> menawarkan keunggulan dalam torsi serta pengurangan noise dan getaran. Penelitian ini membandingkan karakteristik hidrodinamis dan performa propulsi kedua propeller menggunakan simulasi CFD dengan model turbulensi <i>Transition k-kl-ω</i>. Analisis mencakup <i>Thrust</i>, <i>Torque</i>, <i>KT</i>, dan <i>KQ</i> pada rentang 1500–3000 RPM. Hasilnya, <i>Wageningen B-Series</i> menghasilkan <i>Thrust</i> lebih tinggi, mencapai 2610 N pada 1500 RPM dan 3101 N pada 3000 RPM, dibandingkan <i>Toroidal</i> yang hanya 654 N dan 1591 N. Namun, <i>Toroidal</i> unggul dalam torsi, meningkat dari 67 Nm pada 1500 RPM menjadi 205 Nm pada 3000 RPM, sedangkan <i>B-Series</i> hanya 138,58 Nm. Kesimpulannya, <i>Wageningen B-Series</i> lebih unggul dalam <i>Thrust</i>, sementara <i>Toroidal</i> lebih baik dalam torsi dan potensi pengurangan kebisingan. Optimasi geometri <i>Toroidal Propeller</i> diperlukan untuk meningkatkan daya dorong dan efisiensinya agar lebih kompetitif di industri maritim.
Keywords: <i>Wageningen B-Series Propeller</i> <i>Toroidal Propeller</i> <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) <i>Thrust</i> Torsi	
©2025 This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).	

*Corresponding Author:

Tegar Prastyo
Departemen Teknologi Industri, Fakultas Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro (UNDIP)
Semarang 50275, Indonesia
Email: tegarprastyo0205@gmail.com

INTRODUCTION

Propeller merupakan komponen vital dalam sistem propulsi kapal, dengan efisiensinya mempengaruhi kecepatan dan aspek ekonomi

transportasi laut. Karakteristik geometris seperti *pitch ratio* (P/D), *rake angle* (RA), dan *skew angle* (SA) adalah faktor penting dalam menentukan efisiensi *propeller* (Alejandra &

Camacho-zamora 2024), sementara perubahan *flow regimes* dalam *advance velocity ratios* (J) dan *cavitation numbers* (σ) juga berpengaruh pada kinerja *propeller* (Wu et al. 2024; Zhu & Ma 2024).

Meskipun telah banyak penelitian mengenai *propeller Wageningen B-Series*, masih ada tantangan dalam meningkatkan efisiensi propulsi dan mengurangi kebisingan. Di sisi lain, *toroidal propeller* telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi propulsi serta mengurangi getaran dan kebisingan. Penelitian terbaru, termasuk pengembangan oleh *Sharrow Marine* dan MIT, menunjukkan bahwa *Toroidal Propeller* dapat menjadi solusi inovatif untuk tantangan ini.

Pada tahun 2017, *Massachusetts Institute of Technology's Lincoln Laboratory* bekerja sama dengan *Sharrow Marine* mengembangkan *toroidal propeller*, yang diklaim mampu mengurangi kebisingan frekuensi tinggi tanpa kehilangan efisiensi. Kebisingan pada *propeller* umumnya disebabkan oleh getaran akibat pembentukan vorteks ujung bilah (*tip vortices*). *Toroidal propeller* mengurangi kebisingan dengan meminimalkan pembentukan vorteks tersebut melalui desain bilah melengkung yang membentuk struktur tertutup seperti cincin (*closed ring-like structure*). Struktur ini mendistribusikan vorteks secara merata di seluruh bilah, mengurangi resistansi rotasi, dan kebisingan hidrodinamis. Desain ini juga meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur, menjadikannya lebih efisien dan tenang dibandingkan *propeller* konvensional. Namun, mendefinisikan *pitch* pada *Toroidal Propeller* lebih kompleks karena bentuk bilahnya yang melengkung dan hubungan non-linear antara

sudut bilah dan kinerjanya.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan performa hidrodinamis antara *toroidal* dan *Wageningen B-Series Propeller* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Studi ini mengevaluasi parameter penting, seperti *thrust*, *torque*, *Thrust Coefficient* (K_T) dan *Torque Coefficient* (K_Q) dalam berbagai kondisi operasional (Viitanen et al. 2022). Dengan mengidentifikasi keunggulan dari masing-masing desain, penelitian ini diharapkan memberikan wawasan dan rekomendasi berharga untuk mengoptimalkan performa *propeller* di industri maritim. Temuan penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan sistem propulsi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, mendukung tujuan IMO untuk pelayaran berkelanjutan.

METHOD

Metode simulasi CFD dalam penelitian ini dimulai dengan pembuatan model 3D *propeller* menggunakan *software* CAD. Setelah itu, *mesh* dibuat dengan kepadatan tinggi di area kritis seperti ujung bilah dan *trailing edge*. *Boundary conditions* kemudian diatur, mencakup *inflow velocity*, *pressure outlet*, dan *wall conditions* pada *blade propeller*. Model turbulensi yang sesuai, seperti *Transition k-kl- ω* , model turbulensi *Transition k-kl- ω* digunakan untuk menangkap efek transisi aliran dari laminar ke turbulen, terutama di area bilah *propeller*. Model ini memanfaatkan tiga persamaan diferensial: energi kinetik turbulensi (k), frekuensi spesifik turbulensi (ω), dan panjang skala transisi (kl) (White 2016). Persamaan dalam model ini secara umum dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \cdot \nabla k = P_k - D_k + \nabla \cdot (v_t \nabla k) \quad (1)$$

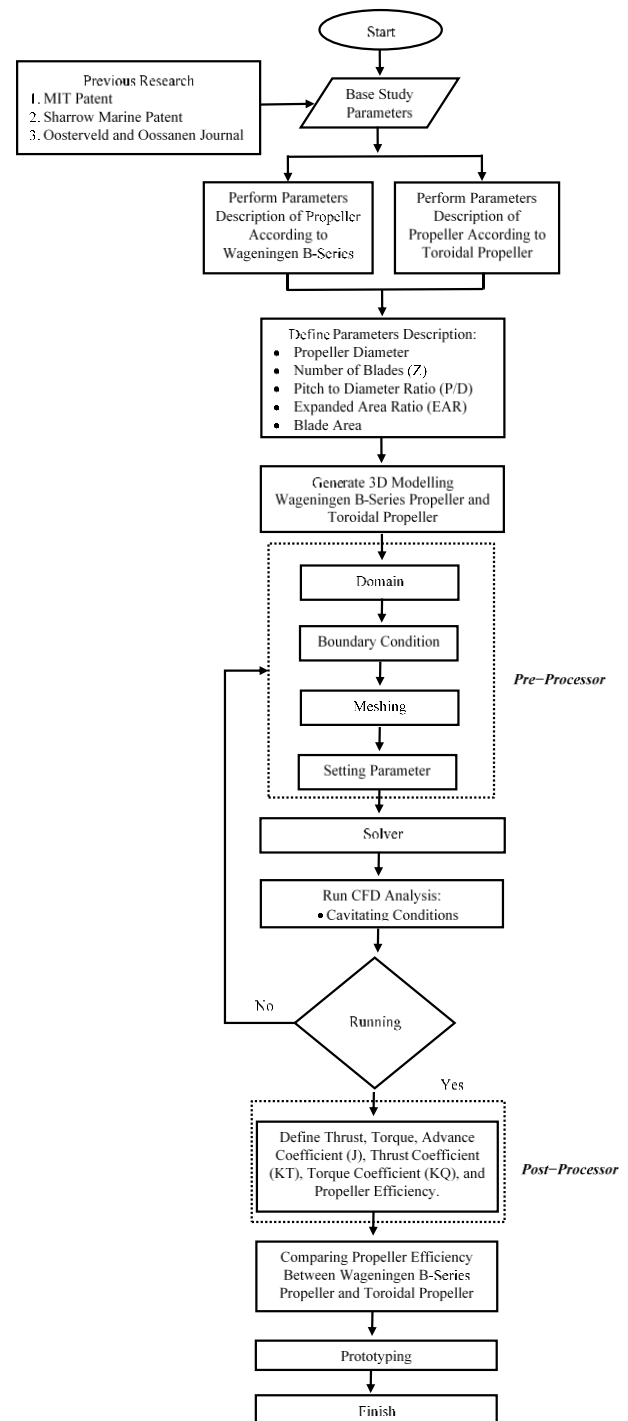
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \cdot \nabla \omega = P_\omega - D_\omega + \nabla \cdot (v_t \nabla \omega) \quad (2)$$

$$\frac{\partial kl}{\partial t} + U \cdot \nabla kl = P_{kl} - D_{kl} + \nabla \cdot (v_t \nabla kl) \quad (3)$$

Simulasi CFD kemudian dijalankan dengan variasi parameter operasional. Hasilnya dianalisis melalui *post-processing* untuk memvisualisasikan aliran, tekanan, dan distribusi kecepatan di sekitar propeller.

Simulasi ini menggunakan dua model *propeller*, yaitu *Wageningen B-Series* (model E779a) dan *Toroidal Propeller*, digunakan dengan beberapa parameter geometri yang signifikan. Diameter *propeller* untuk kedua model adalah 227.27 mm dengan jumlah bilah sebanyak 4. *Pitch ratio* ditetapkan pada 1.1 untuk keduanya, sedangkan pada model E779a, sudut *skew* pada ujung bilah adalah 4.8° dan *rake* nominal sebesar 4.6° . Rasio area yang diperluas (*expanded area ratio*) untuk *propeller Wageningen B-Series* adalah 0.689, sementara untuk *toroidal propeller* sedikit lebih rendah pada 0.639. Blade area untuk *Toroidal Propeller* mencapai 25,942.52 mm² sedangkan *propeller Wageningen B-Series* 27,924.18 mm², Diameter *hub* pada garis referensi *propeller* untuk kedua model adalah 45.53 mm, dengan panjang hub sebesar 68.30 mm, Detail metodologi simulasi CFD yang digunakan untuk mensimulasikan *Thrust* dan *Torque* pada *Toroidal Propeller* ditunjukkan dalam Gambar 1.

Gambar 1 Bagan alir (*Flowchart*) ini menggambarkan alur sistematis penelitian CFD dalam membandingkan performa *Toroidal Propeller* dan *Wageningen B-Series Propeller*. Proses dimulai dari studi literatur untuk memahami teori dasar dan data desain.



Gambar 1. Bagan alir (*Flowchart*)

Dilanjutkan ke tahap perancangan geometri *propeller*, kemudian masuk ke *pre-processing* meliputi pembuatan domain, penentuan *boundary condition*, *meshing*, dan pengaturan parameter simulasi. Tahap *solver* mengatur pemodelan aliran. Selanjutnya, simulasi

dijalankan untuk berbagai ukuran *grid* guna memastikan konvergensi dan independensi *grid*. Akhirnya, dilakukan analisis performa propulsi berdasarkan hasil CFD, yang diakhiri dengan kesimpulan perbandingan *thrust* dan torsi antara kedua *propeller*.

Simulasi ini dilakukan pada beberapa kondisi operasional untuk mengukur performa *propeller* di bawah kecepatan rotasi yang berbeda, yaitu 25, 30, 40, dan 50 putaran per detik (RPS), atau setara dengan 1500, 1800, 2400, dan 3000 putaran per menit (RPM). Parameter yang dianalisis meliputi *Thrust*, *Torque*, *Thrust Coefficient (KT)*, dan *Torque Coefficient (KQ)* pada setiap tingkat rotasi.

Tabel 1. Kondisi Operasional Propeller Wageningen B-Series dan Propeller Toroidal

Parameter	Wageningen B-Series	Toroidal Propeller	Sumber
<i>Propeller Diameter</i>	227.27 mm	227.27 mm	INSEAN E779A Model; Data Penulis
<i>Number of Blades</i>	4	4	INSEAN E779A Model; Data Penulis
<i>Pitch Ratio</i>	1.1	1.1	INSEAN E779A Model; Data Penulis
<i>Skew Angle at Blade Tip</i>	4.8°	-	INSEAN E779A Model
<i>Rake (Nominal)</i>	4.6°	-	INSEAN E779A Model
<i>Expanded Area Ratio</i>	0.689	0.639	INSEAN E779A Model; Data Penulis
<i>Blade Area</i>	27,924.18 mm ²	25,942.52 mm ²	INSEAN E779A Model; Data Penulis
<i>Hub</i>	45.53 mm	45.53 mm	INSEAN

<i>Diameter (at prop. Ref. line)</i>			E779A Model; Data Penulis
<i>Hub Length</i>	68.30 mm	68.30 mm	INSEAN E779A Model; Data Penulis

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

RESULTS AND DISCUSSION

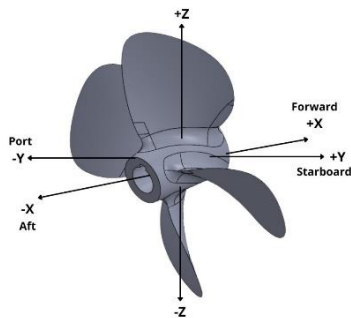
Proses pembuatan model untuk *Wageningen B-Series Propeller* dan *Toroidal Propeller* menggunakan pendekatan yang berbeda tetapi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi propulsi dan mengurangi kebisingan serta getaran.

Wageningen B-Series Propeller dibuat berdasarkan tabel geometri umum dan persamaan (Adietya et al. 2023), yang memungkinkan pembuatan bagian bilah dengan koordinat yang akurat. Geometri 3D *propeller* kemudian dibuat menggunakan *SolidWorks*, dengan data geometris dirangkum dalam tabel 2, dan orientasi rotasi ditentukan sesuai standar hidrodinamika ITTC (Guo et al. 2023; Yeh et al. 2023).

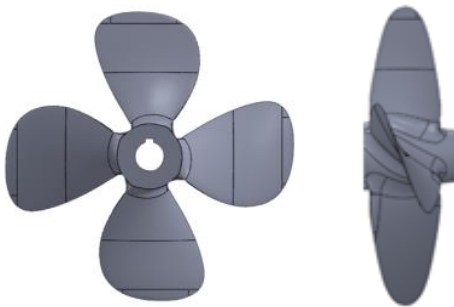
Tabel 2. Ukuran Geometri Wageningen B-Series Propeller

<i>E779a Propeller model</i>	
<i>Propeller Diameter</i>	227.27 mm
<i>Number of blades</i>	4
<i>Pitch ratio</i>	1.1
<i>Skew angle at blade tip</i>	4°48' (positive)
<i>Rake (nominal)</i>	4°35' (forward)
<i>Expanded area ratio</i>	0.689
<i>Hub diameter (at prop. Ref. line)</i>	45.53 mm
<i>Hub length</i>	68.30 mm

Sumber: Geometric INSEAN E779A Propeller Model



Gambar 2. Global Coordinate System Propeller Wageningen B-Series



Gambar 3. Model Propeller Wageningen B-Series dalam 3D

Desain geometri *Toroidal Propeller* kapal diperoleh dari analisis parametrik dan simulasi komputasi untuk memaksimalkan efisiensi propulsi dan mengurangi kebisingan serta getaran. Desain *Toroidal Propeller* yang unik mengacu pada prinsip-prinsip hidrodinamika canggih dan analisis aliran fluida, di mana bilah-bilah *propeller* membentuk lingkaran penuh menyerupai cincin. Berdasarkan istilah hidrodinamika dari ITTC (Guo et al. 2023; Yeh et al. 2023).

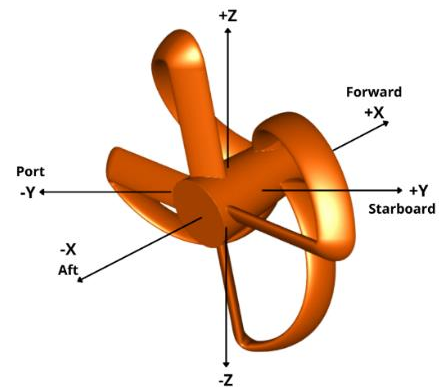
Desain *propeller* ini juga merujuk pada dua paten penting yang memberikan fondasi dalam pengembangan *Toroidal Propeller* yaitu paten MIT No. US 2019/0135410 A1, yang dipublikasikan pada tanggal 9 Mei 2019 dan paten Sharrow Marine No. US 9,926,058 B2, yang dipublikasikan publikasi 27 Maret 2018. Semua data geometris *propeller* ini tersedia dan

dirangkum dalam tabel 3.

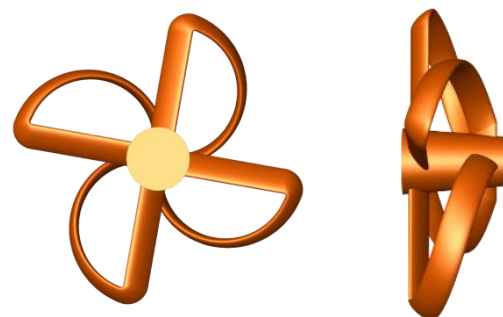
Tabel 3 Ukuran Geometri *Toroidal Propeller*

<i>Toroidal Propeller</i>	
<i>Propeller Diameter</i>	227.27 mm
<i>Number of blades</i>	4
<i>Pitch ratio</i>	1,1
<i>Expanded area ratio</i>	0.639
<i>Blade area</i>	25.942,52 mm ²
<i>Hub diameter (at prop. Ref. line)</i>	45.53 mm
<i>Hub length</i>	68.30 mm

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024



Gambar 4. Global Coordinate System Toroidal Propeller



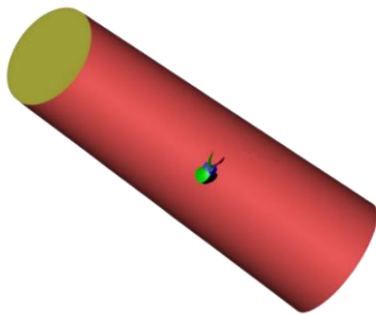
Gambar 5. Toroidal Propeller Model Dalam 3D

Computational Domain

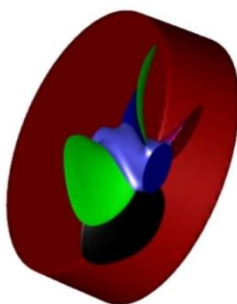
Simulasi dilakukan dalam 3D dengan asumsi keadaan *steady state*. Karena *open water conditions*. Penelitian *computational domain* menggunakan *multiple reference frame (MRF)*, juga dikenal sebagai pendekatan *frozen rotor*. Metode ini membagi domain menjadi dua batas

(*boundary*): Bagian berputar (*Rotating part*) dan bagian tetap (*fixed part*). Metode MRF memberikan analisis situasi bahwa domain yang berputar dianggap berputar relatif terhadap bagian yang diam.

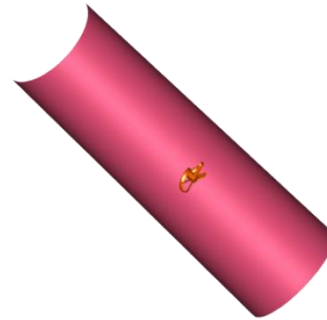
Sedangkan metode *generalized grid interface* (*GGI*) memberikan pendekatan ke permukaan yang kontinu (Hosien & Selim 2017). *statis* atau *frozen domain* memiliki lebar 3 diameter dan panjang 10 diameter, untuk memungkinkan perkembangan fluida terbuka setelah melewati *propeller*. Rotor, yang terletak dekat dengan *propeller*, memiliki lebar 0,38 diameter dan tinggi 1,2 diameter



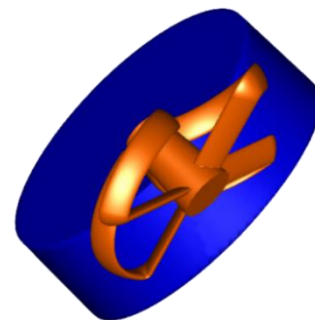
Gambar 6. Domain Statik pada *Propeller Wageningen B-Series*



Gambar 7. Domain Berputar pada *Propeller Wageningen B-Series*



Gambar 8. Domain Statik pada *Toroidal Propeller*



Gambar 9. Domain Berputar pada *Toroidal Propeller*

Boundary Condition

Pengaturan *boundary condition* ini dirancang untuk memastikan simulasi CFD menangkap kondisi fisik dan dinamika fluida yang relevan dengan akurasi tinggi (Helal et al. 2018). Model transisi turbulensi *k-kl- ω* yang digunakan pada *propeller* dan inlet membantu dalam menangkap perubahan aliran dari *laminar* ke *turbulen* secara tepat (Li & Sun 2023). Variasi kecepatan rotasi *propeller* dari 1500 rpm hingga 3000 rpm memberikan gambaran tentang performa *propeller* pada berbagai kondisi operasional. Penggunaan *slip wall* dan *smooth wall* pada *boundary wall* membantu dalam mengurangi efek gesekan dan gangguan aliran yang tidak diinginkan, sehingga simulasi dapat memodelkan perilaku *propeller* dan interaksi dengan *fluida* secara lebih akurat dan realistis.

Tabel 4. *Boundary Physics*

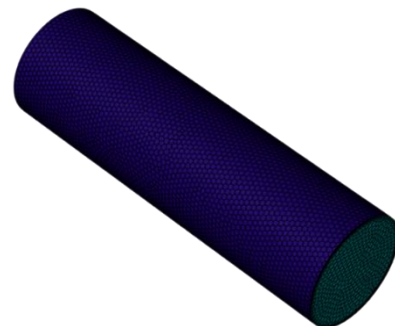
<i>Boundaries</i>		
<i>Boundary – Propeller</i>		
Type	Wall	
Location	PROP	
<i>Settings</i>		
Shear Condition	No Slip	
Mass	And	Normal Speed
Momentum		
Normal Speed	1500 rpm – 3000 rpm	
Turbulence	Transition $k\text{-}kl\text{-}\omega$	
Axis Definition	Coordinate Axis	
Rotation Axis	Pada Sumbu -x	
<i>Boundary - INLET</i>		
Type	INLET	
Location	INLET	
<i>Settings</i>		
Laminar	Kinetic	1e-6 [m2/s2]
Energy		
Turbulent	1%	
Intensity		
Heat Transfer	Static Temperature	
Turbulence	Transition $k\text{-}kl\text{-}\omega$	
<i>Boundary – OUTLET</i>		
Type	OUTLET	
Location	OUTLET	
<i>Settings</i>		
Backflow	Normal to Boundary	
Direction		
Specification		
Method		
Backflow Pressure	Total Pressure	
Specification		
Backflow	1%	
Turbulence		
Intensity		
<i>Boundary – WALL</i>		
Type	WALL	
Location	WALL	
<i>Settings</i>		
Mass	And	Slip Wall
Momentum		
Wall Roughness	Smooth Wall	

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

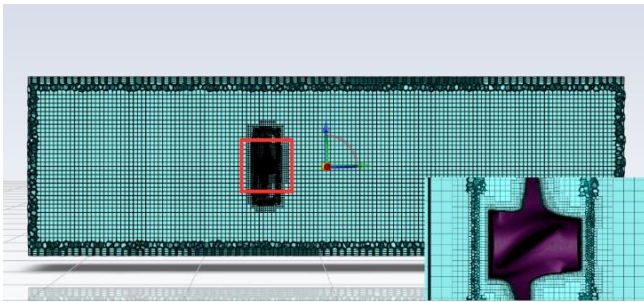
Meshing

Jenis *meshing* yang diunggulkan untuk *propeller* adalah menggunakan *unstructured grid* dan *hybrid mesh* dengan bentuk *poly-hexcore*. *Meshing* ini dibuat menggunakan *software* berbasis CFD karena *mesh* hibrida memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam prediksi kinerja propulsi, seperti yang disimpulkan oleh Morgut dan Nobile. Dibandingkan *mesh* hexa-terstruktur, *mesh* hibrida lebih mudah dibuat, dengan sel yang lebih kecil di sekitar dinding bilah dan membesar menuju batas luar domain. Domain berputar dan tetap dipisahkan, dengan antarmuka "wall to internal" digunakan untuk menggabungkan keduanya.

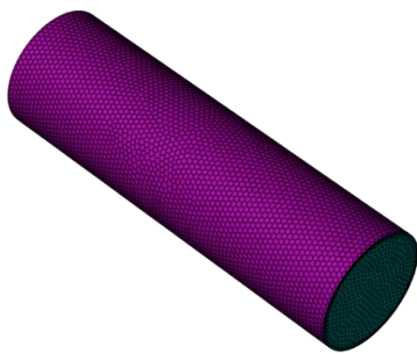
Untuk meningkatkan kepadatan *mesh* pada area kritis seperti permukaan *propeller*, penulis menggunakan *local sizing* untuk memastikan akurasi yang lebih baik. Metode ini meminimalkan jumlah elemen *mesh* sekaligus mempertahankan detail di area penting.



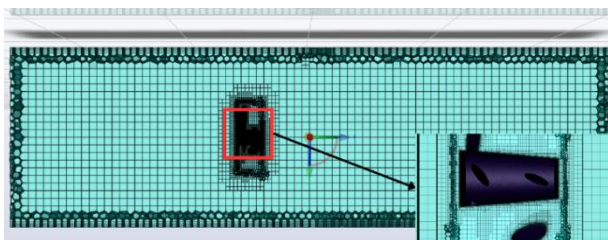
Gambar 10. Mesh Hibrida Poly-Hexcore Untuk Domain Statik pada Propeller Wageningen B-Series



Gambar 11. Mesh Hibrida Poly-Hexcore Untuk Domain Berputar Menggunakan Local Sizing pada Propeller Wageningen B-Series



Gambar 12. Mesh Hibrida Poly-Hexcore Untuk Domain Statik pada Toroidal Propeller



Gambar 13. Mesh Hibrida Poly-Hexcore Untuk Domain Berputar Menggunakan Local Sizing pada Toroidal Propeller

Grid Independence

Berdasarkan buku (Versteeg, H. K., & Malalasekera 2007) *Grid Independence* memastikan keakuratan simulasi CFD dengan menganalisis pengaruh ukuran *mesh* terhadap hasil. Simulasi dimulai dengan *mesh* kasar dan secara bertahap diperhalus. Hasil *Thrust* dibandingkan pada tiap tingkat *mesh* hingga

perbedaannya kurang dari 2%, menandakan *grid independence* tercapai. *Mesh* halus lebih akurat tetapi membutuhkan waktu lebih lama, sehingga simulasi optimal mengutamakan akurasi dengan efisiensi waktu.

Tabel 5. Grid Independence Test Propeller Wageningen B-Series

No	Total Number of Elements	Thrust (N)	Selisih %	Running Time
1	1.846.539	2.601	-	2 jam 12 menit
2	2.497.002	2.664	-2,47%	3 jam 20 menit
3	2.652.003	2.610	2,03%	3 jam 54 menit
4	3.069.186	2.607	0,115%	4 jam 47 menit
5	3.663.159	2.604	0,115%	5 jam 21 menit
6	4.239.765	2.648	1,689%	6 jam 10 menit

Sumber:, Data Simulasi Penulis, 2024

Tabel 6Grid Independence Test Toroidal Propeller

No	Total Number of Elements	Thrust (N)	Selisih %	Running Time
1	2.027.164	686	-	2 jam 40 menit
2	2.306.268	672	-2.04%	3 jam 21 menit
3	2.907.152	664	-1.19%	3 jam 53 menit
4	3.384.040	654	-1.51%	4 jam 43 menit
5	3.829.265	654	0%	6 jam 17 menit
6	4.635.996	656	0.31%	7 jam 8 menit

Sumber:, Data Simulasi Penulis, 2024

Setting Parameter

Perangkat lunak CFD digunakan untuk menganalisis aliran tiga dimensi yang melibatkan viskositas, aliran tak tunak (*unsteady*), untuk menyelesaikan persamaan dalam simulasi, digunakan teknik *coupled* yang menghubungkan tekanan dan kecepatan, sehingga menghasilkan solusi yang lebih stabil dan cepat. Selain itu, skema *First Order Upwind* diterapkan untuk menangani istilah konveksi dalam persamaan transportasi. Metode ini menjaga stabilitas

numerik agar hasil simulasi tetap akurat tanpa gangguan osilasi yang dapat memengaruhi analisis turbulensi. Detail pengaturan simulasi ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 7. Solver Configuration Untuk Cavitating Conditions

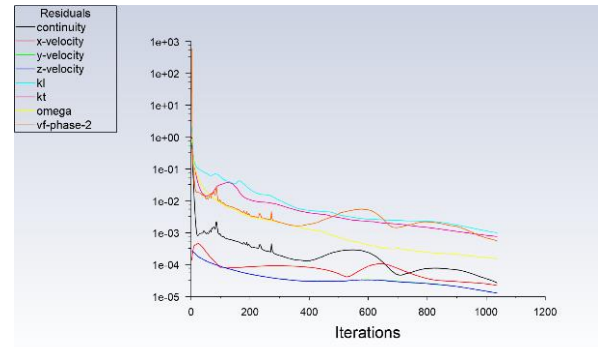
Parameter	Configuration
Inlet heat transfer	Static temperature; $T(^{\circ}C)$
Turbulent intensity	Low intensity; 1%
Outlet pressure	Static pressure; $P_{out} = P_{ref}$
Phases	1. Water Liquid 2. Water Vapor
Rotating domain	Angular velocity
Model	Multiphase; Mixture
Heat transfer	Total energy
Turbulence Model	Transition k-kl- ω
Mass transfer (Cavitation Model)	Zwart-Gerber-Belamri
Saturation vapor	Pressure; P_v
Vapor Pressure	3.170×10^3 Pa
Pressure Link	Couple
Pressure	Standard
Momentum and	First Order Upwind
Turbulence Parameters	
Solver	Unsteady

Sumber:., Data Simulasi Penulis, 2024

Convergence

Pada simulasi CFD propeller *Wageningen B-Series*, proses konvergensi dicapai dengan memantau nilai residual dan iterasi. Batas konvergensi ditetapkan pada nilai residual 10^{-3} atau iterasi maksimal 20.000. Hasil menunjukkan bahwa nilai residual turun di bawah 10^{-3} pada iterasi ke-1037, menandakan solusi stabil sebelum mencapai batas iterasi. Hal ini menunjukkan akurasi hasil simulasi sudah memenuhi standar, meskipun model kompleks dengan *grid* besar digunakan untuk

meningkatkan presisi. Simulasi ini memastikan hasil *Thrust* dan parameter lainnya valid dan dapat dipercaya.



Gambar 14. Konvergensi pada simulasi CFD sebesar 10^{-2}

Hasil Simulasi *Thrust* dan *Torque* Propeller *Wageningen B-Series* dan *Toroidal Propeller*

Setelah mendapatkan nilai *meshing* yang optimal, dilakukan simulasi ulang menggunakan jumlah *mesh* optimal untuk propeller *B-Series* dan *Toroidal Propeller*. Untuk propeller *B-Series*, digunakan *grid* nomor 3 dengan jumlah *mesh* sebanyak 2.652.003, sedangkan untuk *Toroidal Propeller* digunakan *grid* nomor 4 dengan jumlah *mesh* sebanyak 3.384.040. Hasil simulasi ini menghasilkan data *Thrust* (gaya dorong) dan *Torque* (momen puntir), yang kemudian ditampilkan pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10

Tabel 8. Tabel Hasil Simulasi *Thrust* dan *Torque* Propeller *Wageningen B-Series*

Propeller	RPS	RPM	<i>Thrust</i> (N)	<i>Torque</i> (Nm)
B-Series	25	1500	2.610	102
	30	1800	2.867	113,45
	40	2400	3.036	127,6
	50	3000	3.101	138,58

Sumber:., Data Simulasi Penulis, 2024

**Tabel 9. Tabel Hasil Simulasi *Thrust* dan *Torque*
*Toroidal Propeller***

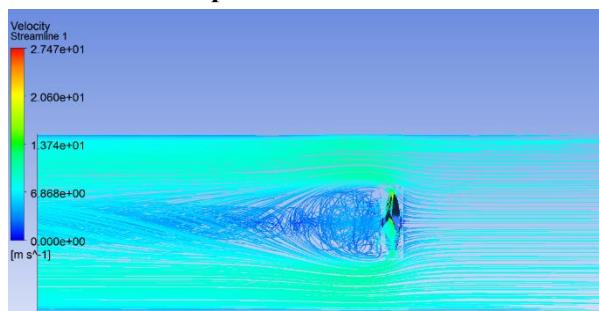
Propeller	RPS	RPM	<i>Thrust</i> (N)	<i>Torque</i> (Nm)
Toroidal	25	1500	654	67
	30	1800	840	90
	40	2400	1104	137
	50	3000	1591	205

Sumber:., Data Simulasi Penulis, 2024

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Wageningen B-Series Propeller* lebih unggul dalam menghasilkan *thrust* pada seluruh rentang kecepatan. Pada RPM 1500 dan 3000, B-Series menghasilkan *thrust* masing-masing sebesar 2610 N dan 3101 N, jauh lebih tinggi dibandingkan 654 N dan 1591 N dari *Toroidal Propeller*. Hal ini disebabkan oleh desain *blade* konvensional B-Series yang lebih efektif dalam mendorong *massa fluida* secara langsung.

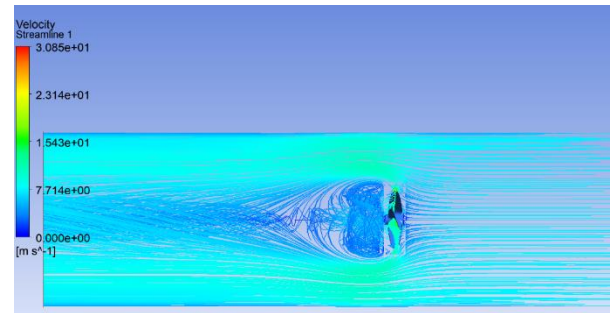
Sebaliknya, *Toroidal Propeller* unggul dalam menghasilkan torsi, khususnya pada RPM tinggi. Pada RPM 3000, torsi Toroidal mencapai 205 Nm, lebih besar dari B-Series yang hanya 138,58 Nm. Keunggulan ini berasal dari desain tertutup pada ujung *blade* *Toroidal* yang mampu mengurangi *tip vortex* dan meningkatkan kestabilan aliran, meskipun *thrust*-nya lebih kecil.

Hasil *Streamline* AntaraPropeller Wageningen B-Series dan Propeller Toroidal



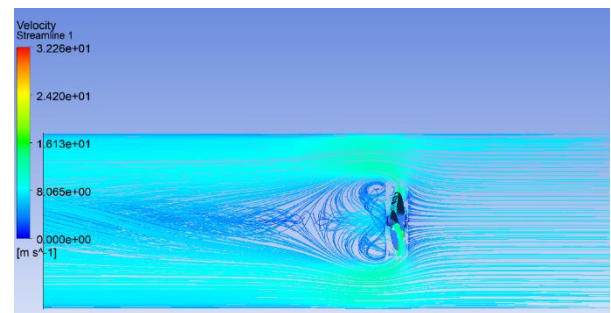
Gambar 15. Result Streamline Propeller Wageningen

B-Series 1500 RPM



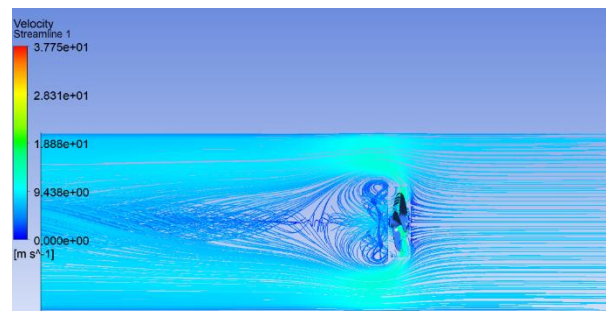
Gambar 16. Result Streamline Propeller Wageningen

B-Series1800 RPM



Gambar 17. Result Streamline Propeller Wageningen

B-Series 2400 RPM

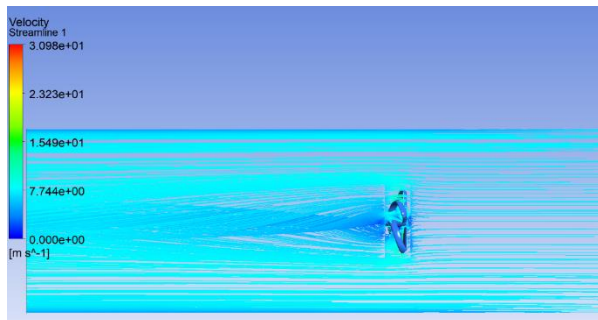


Gambar 18. Result Streamline Propeller Wageningen

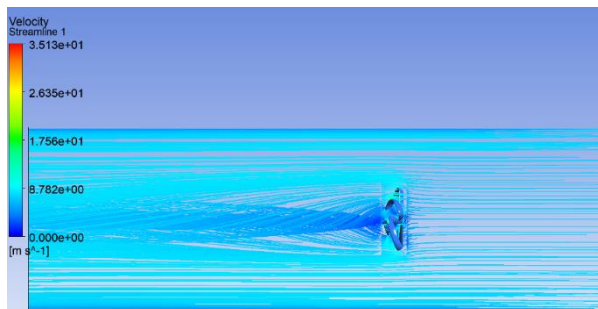
B-Series 3000 RPM

Gambar 15 menunjukkan hasil *streamline* *Propeller Wageningen B-Series* pada 1500 RPM, di mana terbentuk pusaran besar berwarna biru tua di sisi belakang bilah, menandakan kecepatan aliran rendah dan potensi kavitasi. Gambar 16 pada 1800 RPM menunjukkan pola pusaran yang lebih padat dan turbulen, mengindikasikan distribusi tekanan yang kurang merata. Gambar 17 pada 2400 RPM menampilkan pusaran yang lebih menyebar dan stabil, dengan aliran

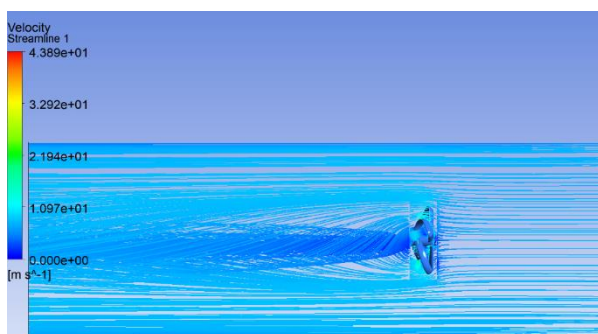
dominan berwarna biru tua, menandakan kecepatan sedang hingga tinggi di sekitar *propeller*. Gambar 18 pada 3000 RPM menunjukkan pusaran dengan ukuran serupa 2400 RPM namun lebih padat, mengindikasikan turbulensi yang meningkat akibat energi kinetik yang lebih besar.



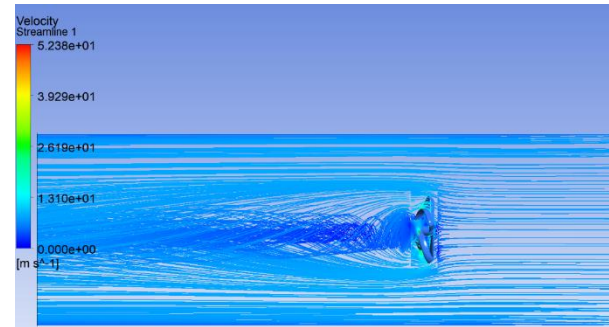
Gambar 19. Result Streamline Propeller Toroidal 1500 RPM



Gambar 20. Result Streamline Propeller Toroidal 1800 RPM



Gambar 21. Result Streamline Propeller Toroidal 2400 RPM



Gambar 22. Result Streamline Propeller Toroidal 3000 RPM

Gambar 19 menunjukkan *streamline* Propeller Toroidal pada 1500 RPM, dengan pusaran kecil yang membesar ke belakang. Dominasi warna biru tua mengindikasikan aliran stabil dan kecepatan rendah, berbeda dari pusaran besar pada *Propeller Wageningen B-Series*. Gambar 20 pada 1800 RPM menunjukkan pusaran yang tetap terkontrol, meski membesar ke belakang. Ini menandakan aliran lebih terkendali dan efisiensi lebih baik dibanding B-Series pada RPM yang sama. Gambar 21 pada 2400 RPM menunjukkan peningkatan turbulensi, namun aliran tetap stabil.

Warna aliran dari biru tua ke biru muda menunjukkan kenaikan energi kinetik yang bertahap, tidak seintens B-Series. Gambar 22 pada 3000 RPM menunjukkan pusaran lebih besar dan menyebar jauh dari *propeller*. Distribusi energi kinetik lebih merata dibanding B-Series, yang menunjukkan turbulensi tinggi di dekat *propeller*.

KESIMPULAN

Penelitian mengenai perbandingan antara *Toroidal Propeller* dan *Wageningen B-Series Propeller* menggunakan simulasi CFD menunjukkan kesimpulan berikut, *Wageningen B-Series Propeller* unggul dalam menghasilkan *thrust* pada berbagai kecepatan. Pada RPM 1500,

thrust B-Series mencapai 2610 N, jauh lebih besar dibandingkan *Toroidal Propeller* yang hanya 654 N, dengan selisih 1956 N (299,08%). Pada RPM 3000, *thrust B-Series* tetap lebih tinggi dengan nilai 3101 N dibandingkan *Toroidal* 1591 N, menghasilkan selisih 1510 N (94,94%).

Namun, *Toroidal Propeller* menunjukkan keunggulan dalam torsi pada RPM rendah hingga sedang. Pada RPM 1500, torsi *Toroidal* hanya 67 Nm, lebih rendah dari *B-Series* yang mencapai 102 Nm (selisih 35 Nm, 52,24%). Pada RPM 3000, torsi *Toroidal* meningkat hingga 205 Nm, lebih besar dibandingkan *B-Series* 138,58 Nm, dengan selisih -66,42 Nm (-47,93%).

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa rekomendasi untuk penelitian lanjutan terkait *Toroidal Propeller*. Pertama, optimasi geometri bilah perlu dilakukan, seperti meningkatkan panjang *chord* dan jumlah bilah (Z), untuk menyamakan *Expanded Area Ratio* (EAR) dan *Blade Area* dengan *Wageningen B-Series*. Penyesuaian ini bertujuan untuk meningkatkan performa *Thrust* dan efisiensi propulsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adietya, B.A., Indriyanto, M., S. S. & Kusuma, C., 2023, 'Dimensional Analysis and Experimental Design for Predicting The Calculation of The Value of The Torque Coefficient on Propeller B-Series, Case Study of B3-50 And B5-80', *Journal of Marine-Earth Science and Technology*, 3(3).
- Alejandra, V. & Camacho-zamora, N., 2024, 'Numerical Analysis and Validation of an Optimized B-Series Marine Propeller Based on NSGA-II Constrained by Cavitation'.
- Guo, C., Wang, X., Chen, C., Li, Y. & Hu, J., 2023, 'Numerical Investigation of Self-Propulsion Performance and Noise Level of DARPA Suboff Model', *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6).
- Helal, M.M., Ahmed, T.M., Banawan, A.A. & Kotb, M.A., 2018, 'Numerical prediction of sheet cavitation on marine propellers using CFD simulation with transition-sensitive turbulence model', *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3805–3815.
- Hosien, M.A. & Selim, S.M., 2017, 'Experimental and theoretical investigation on the effect of pumped water temperature on cavitation breakdown in centrifugal pumps', *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(4), 1079–1089.
- Li, T. & Sun, S., 2023, 'Numerical study on the scale effects of two-dimensional cycloidal propellers', *Ocean Engineering*, 279.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W., 2007, *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.)*.
- Viitanen, V., Sipilä, T., Sánchez-Caja, A. & Siikonen, T., 2022, 'CFD predictions of unsteady cavitation for a marine propeller in oblique inflow', *Ocean Engineering*, 266.
- White, F.M., 2016, 'Fluid mechanics (8th ed.)'. McGraw-Hill Education.'
- Wu, R., Liu, H., Chen, W., Ji, S., Cao, L. & Wu, D., 2024, 'Experimental investigation of propeller blade back cavitation induced pressure pulses by synchronous observation', *Ocean Engineering*, 298.
- Yeh, T.H., Chen, S.H., Lin, T.Y. & Chau, S.W., 2023, 'Numerical Investigation of the Propulsive Efficiency of a Containership



under Load Variation', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1288(1).

Zhu, M. & Ma, L., 2024, *A review of recent advances in the effects of surface and interface properties on marine propellers*, *Friction*, 12(2).