

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Model

4.1.1 Wageningen B-Series Propeller

Wageningen B-Series Propeller Geometri propeler diperoleh dari tabel properti geometri umum untuk seri B, serta persamaan dari Oosterveld dan Van Oossanen [9] Menggunakan seri propeler parametrik standar, seperti seri B, memiliki keuntungan besar, karena foil untuk membentuk bagian-bagian bilah dapat dihasilkan dengan koordinat, seperti yang digambarkan dalam gambar 4.1. Setelah menghitung koordinat bagian bilah, Propeller diekspor untuk membuat geometri 3D yang ditunjukkan dalam gambar 4.1 Berdasarkan istilah hidrodinamika dari ITTC [23], sistem koordinat kartesian global (X, Y, Z) dari propeller didefinisikan seperti yang diuraikan dalam Gambar 4.2. Sedangkan pada Gambar 4.3 adalah gambar tampak ketika dilihat dari depan (X) dan samping (Y), kecepatan rotasi positif menunjukkan rotasi searah jarum jam dan kecepatan negatif menunjukkan rotasi berlawanan arah jarum jam, mengikuti aturan tangan kanan. Propeller yang dipilih sebagai kasus uji dalam penelitian ini adalah model propeller 'INSEAN E779A', yang merupakan propeller empat bilah dengan pitch tetap dan berputar ke kanan. Pemodelan geometris propeller ini diperoleh menggunakan perangkat lunak untuk gambar 2D menggunakan *software* berbasis CAD sedangkan untuk gambar 3D menggunakan *software* SOLIDWORKS. Semua data geometris propeller ini dirangkum dalam Tabel 4.1

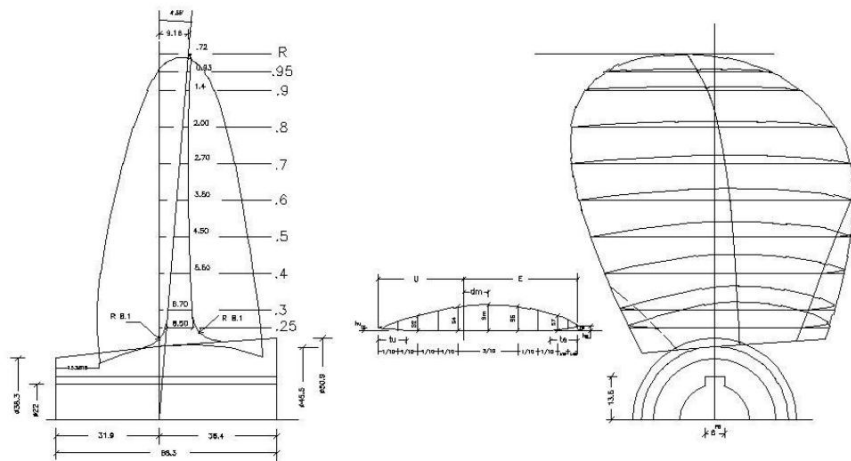
Tabel 4.1 Ukuran Geometri Propeller Wageningen B-Series

<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>	4,8°
<i>Rake (nominal)</i>	4,6°
<i>Expanded area ratio</i>	0.689
<i>Blade area</i>	27,924.18 mm ²
<i>Hub diameter (at prop. Ref. line)</i>	45.53 mm
<i>Hub length</i>	68.30 mm

Sumber: *Geometric INSEAN E779A Propeller Model*

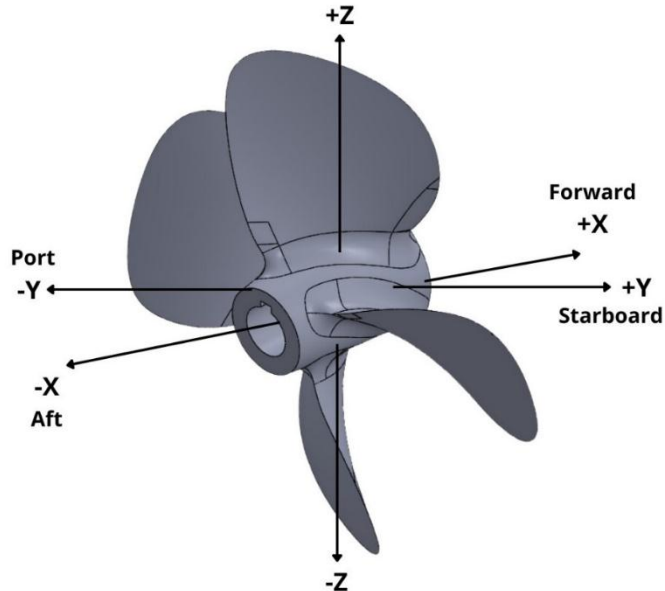
Model propeller yang akan dibuat mengikuti batasan masalah yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu menggunakan propeller tipe Wageningen B-Series. Langkah-langkah pembuatan model propeller Wageningen B-Series meliputi:

- a. Memasukkan data propeller yang akan dimodelkan ke dalam *software Computer Aided Design* (CAD). Data propeller ini sesuai dengan batasan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya. Gambar 4.1 menampilkan hasilnya dalam bentuk CAD.

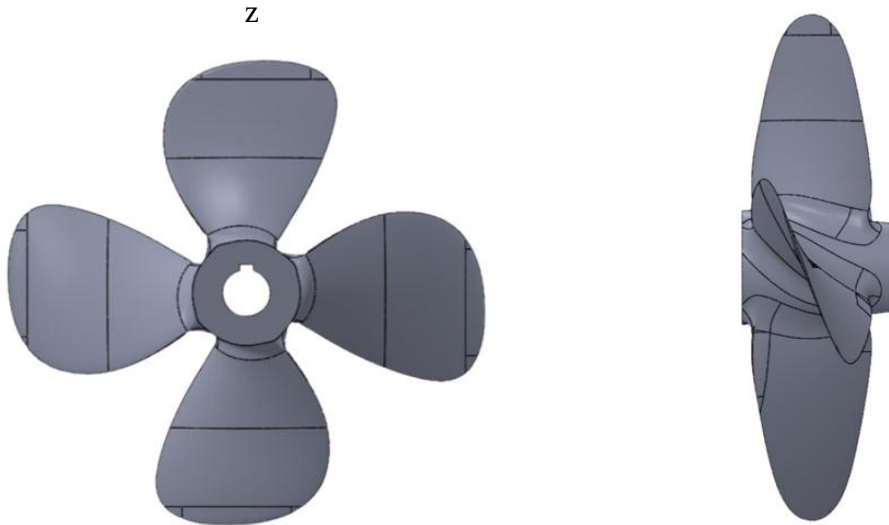


Gambar 4.1 *Computer Aided Design (CAD) Propeller Wageningen B-Series*
Sumber: INSEAN E779A Propeller Model

- b. Setelah desain dalam bentuk CAD selesai, langkah berikutnya adalah pembuatan permukaan (*surface*). Setelah permukaan terbentuk, propeller disolidkan menggunakan *software* SOLIDWORKS dan kemudian diperiksa menggunakan *software* berbasis CFD yang telah dirancang.



Gambar 4.2 *Global Coordinate System Propeller Wageningen B-Series*
Sumber: INSEAN E779A Propeller Model



Gambar 4.3 Propeller Wageningen B-Series Model Dalam 3D
Sumber: INSEAN E779A *Propeller Model*

4.1.2 *Toroidal Propeller*

Desain geometri *Toroidal Propeller* kapal diperoleh dari analisis parametrik dan simulasi komputasi untuk memaksimalkan efisiensi propulsi dan mengurangi kebisingan serta getaran. Desain propeller toroidal 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 [23], sistem koordinat kartesian global (X , Y , Z) dari propeller didefinisikan seperti yang diuraikan dalam Gambar 4.4. Sedangkan pada Gambar 4.5 adalah gambar tampak ketika dilihat dari depan (X) dan samping (Y), kecepatan rotasi positif menunjukkan rotasi searah jarum jam dan kecepatan negatif menunjukkan rotasi berlawanan arah jarum jam, mengikuti aturan tangan kanan. Pemodelan geometris propeller ini diperoleh menggunakan perangkat lunak untuk gambar 2D menggunakan *software* berbasis CAD, sedangkan untuk gambar 3D menggunakan *software* SOLIDWORKS. Desain propeller toroidal ini menawarkan keunggulan besar dalam efisiensi propulsi dan pengurangan kebisingan. Keuntungan tambahan dari propeller toroidal adalah pengurangan signifikan dalam kebisingan dan getaran.

Desain propeller ini juga merujuk pada dua paten penting yang memberikan fondasi dalam pengembangan propeller toroidal: paten MIT (Pub. No.: US 2019/0135410 A1, tanggal publikasi 9 Mei 2019) [21] dan paten Sharrow Marine (No. Paten: US 9,926,058 B2, tanggal publikasi 27 Maret 2018), dengan applicant Sharrow Engineering LLC [22]. Semua data geometris propeller ini tersedia dan dirangkum dalam Tabel 4.2

Tabel 4.2 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

Guna memahami dan merancang geometri *Toroidal Propeller*, beberapa parameter kunci perlu dihitung, di antaranya diameter propeller, *pitch*, *pitch ratio*, *blade area*, dan *expanded area ratio* (EAR).

a. Perhitungan Pitch dan Pitch Rasio

Pitch adalah jarak teoritis yang akan ditempuh oleh propeller dalam satu putaran penuh jika propeller bergerak di dalam fluida tanpa slip. Untuk propeller ini, pitch ratio yang diinginkan adalah 1.1, yang berarti pitch propeller adalah 1.1 kali diameter propeller. Rumus yang digunakan untuk menghitung pitch adalah:

$$P = PR \times D$$

Di mana:

- PR = *pitch ratio* (tanpa satuan)
- P = *pitch*, yaitu jarak yang ditempuh oleh propeller dalam satu putaran (dalam mm)
- D = diameter propeller (dalam mm)

Dengan mengetahui pitch ratio ($PR = 1.1$) dan diameter propeller ($D = 227.27$ mm), kita bisa menghitung pitch menggunakan rumus:

$$P = 1.1 \times 227.27 = 250.00 \text{ mm}$$

Pitch propeller yang dihitung adalah 250.00 mm, artinya dalam satu putaran penuh, *Toroidal Propeller* secara teoritis akan menempuh jarak 250 mm. Pitch ratio diverifikasi menggunakan formula:

$$PR = \frac{P}{D} = \frac{250.00}{227.27} = 1.1$$

b. Blade Area

Blade area atau luas permukaan bilah propeller penting untuk menentukan seberapa besar bilah propeller mampu memindahkan fluida saat berputar. Untuk *Toroidal Propeller*, yang memiliki bilah melingkar, perhitungan luas bilah dilakukan dengan memperkirakan lebar bilah yang meluas dari *hub* hingga ujung

bilah. Kita mulai dengan perhitungan *expanded blade area* untuk *Toroidal Propeller* menggunakan rumus dari geometri lingkaran:

$$A_{\text{expanded}} = \text{Jumlah bilah} \times A_{\text{single blade}}$$

Area bilah tunggal ($A_{\text{single blade}}$) dihitung berdasarkan lebar dan panjang lingkaran *blade*. Untuk menyederhanakan, jika kita ambil lebar *blade* toroidal, kita bisa perkirakan berdasarkan rasio propeller diameter ke *hub* diameter. Kita perlu mengasumsikan nilai lebar *blade* yang didistribusikan dari *hub* hingga ujung *blade* untuk menghitung *blade area*. Misalkan lebar *blade* (W) pada *Toroidal Propeller* adalah jarak dari *hub* diameter ke ujung propeller:

$$W = \frac{D - \text{Hub diameter}}{2} = \frac{227.27 - 45.53}{2} = 90.87 \text{ mm}$$

Saat ini dapat menghitung luas bilah tunggal. Karena bentuk toroidal berbentuk lingkaran tertutup, kita bisa menghitung dengan mengasumsikan bagian bilah membentuk setengah lingkaran:

$$A_{\text{single blade}} = \pi \times \left(\frac{W}{2}\right)^2$$

Substitusi nilai $W = 90.87 \text{ mm}$

$$A_{\text{single blade}} = \pi \times \left(\frac{90.87}{2}\right)^2 = \pi \times 45.435^2 = \pi \times 2064.39 = 6,485.63 \text{ mm}^2$$

Total *blade area* untuk keempat bilah adalah:

$$A_{\text{toroidal}} = 4 \times 6485.63 = 25.942,52 \text{ mm}^2$$

Wageningen B-Series Propeller (E779a) penulis telah menghitung *expanded blade area* sebesar **27.924,18 mm²**. Dengan demikian, *blade area* pada *Toroidal Propeller* (25.942,52 mm²) mendekati area yang sama dengan *Wageningen B-Series Propeller*, meskipun sedikit lebih kecil.

c. **Expanded Area Ratio (EAR)**

EAR atau *Expanded Area Ratio* adalah rasio antara luas total bilah propeller dengan area lingkaran propeller. EAR digunakan untuk membandingkan efisiensi propeller dalam menghasilkan gaya dorong. Rumus untuk EAR adalah:

$$EAR = \frac{A_{\text{expanded}}}{A_{\text{disk}}}$$

Area lingkaran propeller dihitung menggunakan diameter propeller (D) yang memberikan luas proyeksi lingkaran penuh.

$$A_{\text{disk}} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Substitusi nilai $D = 227.27 \text{ mm}$

$$A_{\text{disk}} = \pi \times \left(\frac{227.27}{2} \right)^2 = \pi \times 113.635^2 = \pi \times 12,910.98 = 40,565.55 \text{ mm}^2$$

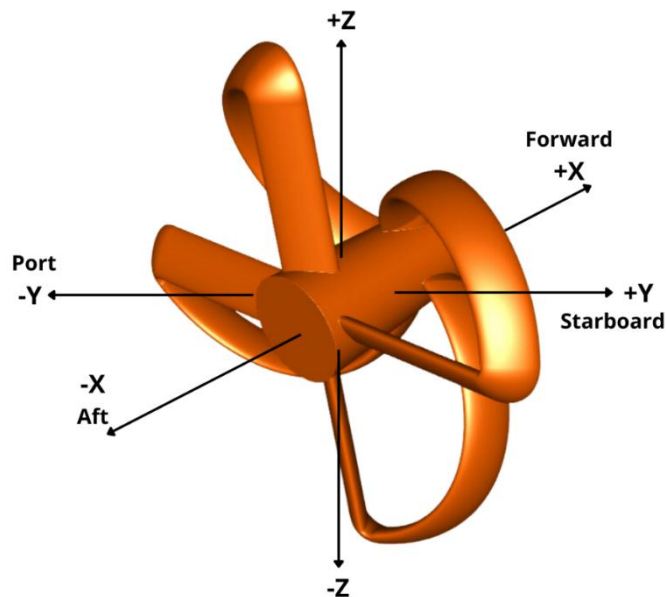
Didapatkan nilai $A_{\text{expanded}} = 25,942.52 \text{ mm}^2$ (total *blade area* dari perhitungan sebelumnya), dan $A_{\text{disk}} = 40,565.55 \text{ mm}^2$ (area lingkaran propeller). Substitusi nilai:

$$EAR = \frac{25,942.52}{40,565.55} = 0.639$$

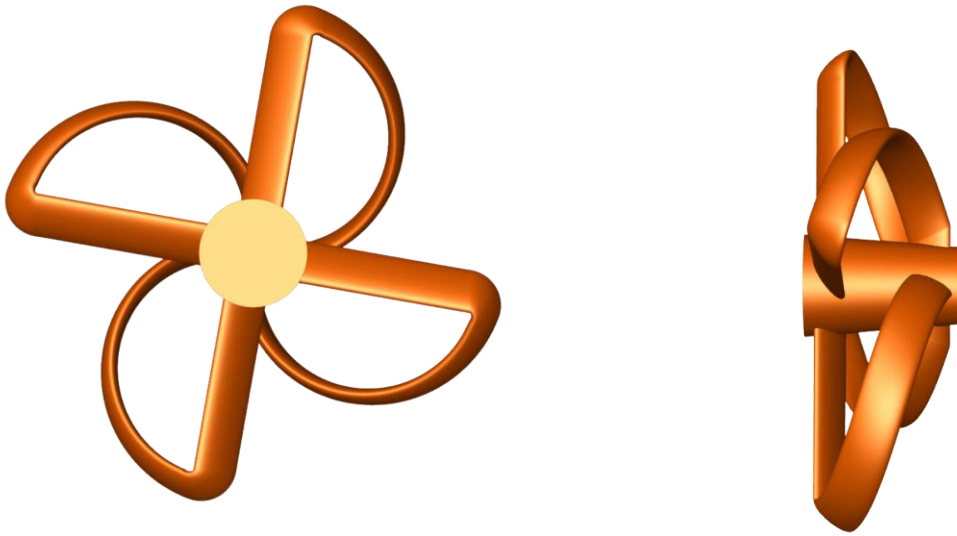
Expanded Area Ratio (EAR) untuk *Toroidal Propeller* dengan *blade area* 25,942.52 mm² dan diameter propeller 227.27 mm adalah 0.639.

Referensi utama untuk perhitungan ini dapat ditemukan dalam literatur desain propeller, seperti:

- Sharrow Engineering LLC. (2019). "Sharrow Propeller Design and Applications."
- MIT News Office (2022). "MIT researchers develop a silent, efficient Toroidal Propeller Design."
- Carlton, J. (2018). "Marine Propellers and Propulsion."



Gambar 4.4 *Global Coordinate System Toroidal Propeller*



Gambar 4.5 *Toroidal Propeller Model Dalam 3D*

4.1.3 Perhitungan Error Persentase EAR dan Blade Area Wageningen B-Series Propeller dan Toroidal Propeller

Menghitung *error* persentase antara *Expanded Area Ratio* (EAR) dan *blade area* dari *Wageningen B-Series Propeller* dan *Toroidal Propeller*, kita bisa menggunakan rumus *error* persentase sebagai berikut:

$$\text{Error Persentase} = \left(\frac{|\text{Nilai A} - \text{Nilai B}|}{\text{Nilai A}} \right) \times 100$$

Nilai EAR untuk Wageningen B-Series adalah 0.689, sedangkan untuk *Toroidal Propeller* adalah 0.639. Perbedaan ini dihitung menggunakan rumus *error* persentase sebagai berikut:

$$\text{Error Persentase EAR} = \left(\frac{|0.689 - 0.639|}{0.689} \right) \times 100$$

$$\text{Error Persentase EAR} = \left(\frac{0.05}{0.689} \right) \times 100 = 7.26\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan sebesar 7.26% antara kedua propeller dalam hal *Expanded Area Ratio*. Walaupun terdapat perbedaan, angka ini masih dalam batas wajar mengingat desain geometri yang sangat berbeda antara kedua propeller tersebut. Selain itu, perbandingan *blade area* juga dilakukan untuk kedua tipe propeller. *Blade area* pada Wageningen B-Series adalah 27,924.18 mm², sedangkan *blade area* pada *Toroidal Propeller* adalah 25,942.52 mm². *Error* persentase dari perbandingan ini adalah sebagai berikut:

$$\text{Error Persentase Blade Area} = \left(\frac{27,924.18 - 25,942.52}{27,924.18} \right) \times 100$$

$$\text{Error Persentase Blade Area} = \left(\frac{1,981.66}{27,924.18} \right) \times 100 = 7.10\%$$

Perbedaan **blade area** antara kedua propeller adalah **7.10%**. Perbedaan ini cukup kecil, yang menunjukkan bahwa meskipun memiliki geometri dan desain yang berbeda, kedua propeller memiliki luas bilah yang hampir sebanding.

Perhitungan ini menggunakan konsep dasar dari *error* persentase, yang umum digunakan dalam perbandingan hasil eksperimen atau simulasi. Referensi ini banyak ditemukan dalam literatur teknik, seperti:

- Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., & Lienhard, J.H. (2007). "Mechanical Measurements". Buku ini menjelaskan cara menghitung *error* persentase, serta pentingnya dalam evaluasi hasil teknik.
- Carlton, J. (2018). "Marine Propellers and Propulsion". Buku ini membahas tentang desain propeller, *Expanded Area Ratio* (EAR), serta metode perhitungan *blade area* dalam evaluasi performa propeller.

4.2 Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode analisis numerik yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah yang berkaitan dengan dinamika fluida, seperti aliran, tekanan, dan interaksi fluida dengan objek tertentu. Dengan kemajuan teknologi komputer yang terus berkembang, metode CFD telah menjadi lebih akurat dan sering digunakan untuk memecahkan persamaan *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), yaitu persamaan fundamental dalam dinamika fluida yang diterapkan pada berbagai jenis propeller.

Penggunaan simulasi CFD sangat penting dalam menganalisis fenomena kavitasi pada propeller. Kavitasi terjadi ketika tekanan lokal pada permukaan propeller turun di bawah tekanan uap air, yang menyebabkan terbentuknya gelembung-gelembung uap. Proses simulasi CFD umumnya terbagi menjadi tiga tahapan utama:

- Pre – Processor*
- Solver Manager*
- Post – Processors*

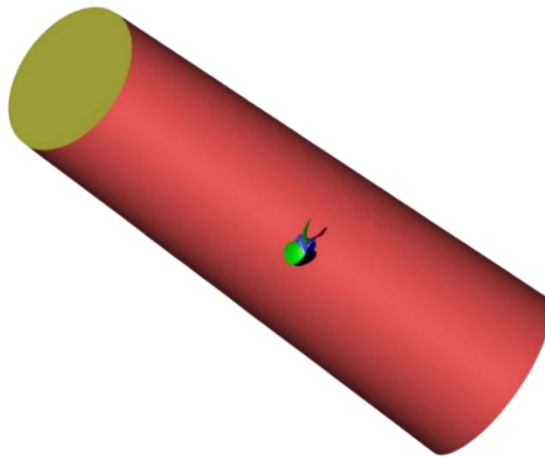
4.2.1 *Pre-Processor*

Buku "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*" oleh Versteeg dan Malalasekera menjelaskan *Pre-Processor* merupakan tahap awal dalam simulasi CFD yang mempersiapkan model sebelum perhitungan dilakukan. Tahap ini melibatkan definisi geometri, yaitu menentukan bentuk dan ukuran dari *domain* fisik yang akan disimulasikan. Selanjutnya, dilakukan *discretization* (*meshing*) untuk membagi domain menjadi elemen-elemen kecil, memungkinkan perhitungan numerik yang lebih akurat. *Mesh* yang tepat sangat penting untuk memastikan kualitas hasil simulasi. Selain itu, *Boundary Conditions* seperti aliran masuk dan keluar juga diatur pada tahap ini. Langkah-langkah ini membantu mempersiapkan data input yang sesuai untuk simulasi (Versteeg & Malalasekera, 2007).

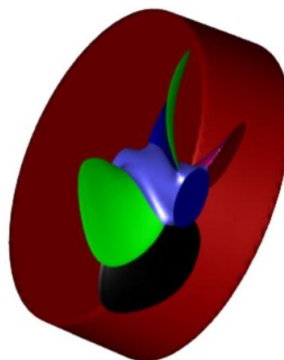
A. Computational Domain

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 [24]. statis atau *frozen domain* memiliki lebar 3 diameter dan panjang 10 diameter, untuk memungkinkan perkembangan fluida terbuka setelah melewati propeler. Rotor, yang terletak dekat dengan propeler, memiliki lebar 0,38 diameter dan tinggi 1,2 diameter.

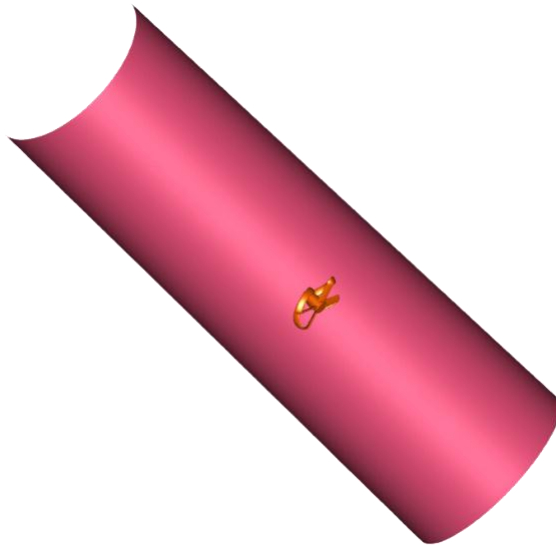
Mempertimbangkan ukuran domain rotor sangat penting, karena mempengaruhi biaya komputasi. Jika domain terlalu besar, hal ini akan meningkatkan biaya; di sisi lain, jika terlalu kecil, hal ini akan mengakibatkan terbentuknya pusaran besar (*formation of large eddies*) di dekat propeler, menyebabkan hasil yang tidak akurat. Sementara itu, subdomain "rotor" diberikan kecepatan rotasi



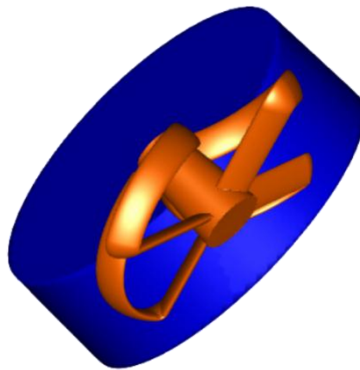
Gambar 4.6 Domain Statik pada Propeller Wageningen B-Series



Gambar 4.7 Domain Berputar pada Propeller Wageningen B-Series



Gambar 4.8 Domain Statik pada *Toroidal Propeller*



Gambar 4.9 Domain Berputar pada *Toroidal Propeller*

Gambar 4.6 hingga 4.9 menggambarkan pengaturan simulasi untuk menganalisis kinerja propeller Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller* dalam domain statik dan berputar. Simulasi ini dilakukan dalam tiga dimensi dengan asumsi *steady state* dan menggunakan *Multiple Reference Frame* (MRF) atau pendekatan *frozen rotor*, yang membagi domain menjadi bagian berputar dan tetap.

Gambar 4.6 menunjukkan domain statik untuk propeller Wageningen B-Series, membantu memahami aliran fluida di sekitar propeller yang diam. Gambar 4.7 menampilkan domain berputar untuk propeller yang sama, memungkinkan evaluasi performa saat beroperasi. Gambar 4.8 memperlihatkan domain statik untuk *Toroidal Propeller*, yang dirancang untuk menganalisis aliran fluida di sekitar propeller yang

tidak berputar. Gambar 4.9 menunjukkan domain berputar untuk *Toroidal Propeller*, menggunakan metode MRF untuk membedakan bagian berputar dan tetap.

Pentingnya ukuran domain rotor dipertimbangkan untuk menghindari biaya komputasi yang tinggi atau hasil yang tidak akurat. Metode *Generalized Grid Interface* (GGI) digunakan untuk transisi yang mulus antara domain berputar dan tetap. Dengan MRF dan GGI, simulasi ini memberikan analisis komprehensif dan akurat terhadap kinerja propeller dalam berbagai kondisi operasi, mendukung pengembangan dan optimasi desain propeller.

Tabel 4.3 Domain Physics

Domain	
Domain – Domain Berputar	
Type	Fluid
Location	Domain Berputar
Settings	
Domain Motion	Rotating
Angular Velocity	1500 rpm – 3000 rpm
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Pada Sumbu -x
Domain – Domain Static	
Type	Fluid
Location	Domain Static
Settings	
Domain Motion	Static

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

B. Boundary Condition

Pengaturan *Boundary condition* ini dirancang untuk memastikan simulasi CFD menangkap kondisi fisik dan dinamika fluida yang relevan dengan akurasi tinggi. Model transisi turbulensi $k\text{-}\kappa\text{-}\omega$ yang digunakan pada propeler dan inlet membantu dalam menangkap perubahan aliran dari laminar ke turbulen secara tepat. Variasi kecepatan rotasi propeler dari 1500 rpm hingga 3000 rpm memberikan gambaran tentang performa propeler 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 propeler dan interaksi dengan fluida secara lebih akurat dan realistis.

Tabel 4.4 Boundary Physics

Boundaries	
Boundary – Propeller	
Type	Wall
Location	PROP
Settings	
Shear Condition	No Slip
Mass And Momentum	Normal Speed
Normal Speed	1500 rpm – 3000 rpm
Turbulence	Transition k-kl- ω
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Pada Sumbu -x
Boundary - INLET	
Type	INLET
Location	INLET
Settings	
Laminar Kinetic Energy	1e-6 [m ² /s ²]
Turbulent Intensity	1%
Heat Transfer	Static Temperature
Turbulence	Transition k-kl- ω
Boundary – OUTLET	
Type	OUTLET
Location	OUTLET
Settings	
Backflow Direction	Normal to Boundary
Specification Method	
Backflow Pressure	Total Pressure
Specification	
Backflow Turbulance Intensity	1%

Boundary – WALL

Type	WALL
Location	WALL
Settings	
Mass And	Slip Wall
Momentum	
Wall Roughness	Smooth Wall

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

a) Inlet

Inlet Boundary Condition (kondisi batas masukan) adalah salah satu jenis kondisi batas yang digunakan dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Kondisi ini menetapkan bagaimana aliran fluida memasuki domain simulasi dari salah satu batasnya. Dalam konteks simulasi rotasi propeller, inlet *Boundary condition* diterapkan pada sisi depan propeller di mana aliran fluida masuk ke dalam domain. Aliran fluida mengalir ke hilir, dari haluan ke buritan, yang berarti aliran bergerak dari depan kapal menuju belakang kapal. Ini memastikan bahwa propeller berinteraksi dengan aliran fluida dalam cara yang realistis dan sesuai dengan kondisi operasional sebenarnya.

Tabel 4.4 *Boundary Physics, Boundary INLET* didefinisikan sebagai tipe *INLET* dan berlokasi pada *INLET*. Pada *Boundary* ini, pengaturan *laminar kinetic energy* diatur pada nilai yang sangat rendah, yaitu $1e-6 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Angka ini menunjukkan bahwa energi kinetik dalam aliran laminar yang masuk sangat kecil, menandakan kondisi aliran yang sangat tenang dan hampir tanpa turbulensi. Hal ini penting untuk menciptakan kondisi awal yang stabil dan realistis bagi aliran yang masuk ke domain simulasi.

Intensitas turbulensi pada inlet diatur sebesar 1%, menunjukkan bahwa aliran yang masuk memiliki sedikit sekali turbulensi. Nilai ini memastikan bahwa aliran masuk tetap stabil dan tidak terganggu oleh fluktuasi kecepatan yang besar, yang bisa mengganggu analisis lebih lanjut di dalam domain. Dengan intensitas turbulensi yang rendah, aliran yang masuk dapat diprediksi dengan lebih baik, memungkinkan hasil simulasi yang lebih akurat dan konsisten.

Selain itu, transfer panas di inlet diatur menggunakan *Static Temperature*, yang menjaga suhu tetap konstan. Ini berarti bahwa aliran yang masuk memiliki suhu tetap, tanpa adanya perubahan suhu yang bisa mempengaruhi sifat aliran dan hasil simulasi. Pengaturan ini penting untuk memastikan bahwa aliran fluida yang masuk memiliki kondisi termal yang konsisten, yang dapat berdampak signifikan pada hasil simulasi hidrodinamika dan termal.

Model turbulensi yang digunakan di inlet adalah *Transition k-kl- ω* , yang konsisten dengan model yang diterapkan pada propeller. Model ini dirancang untuk menangani transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen secara mulus. Dengan menggunakan model ini, simulasi dapat lebih akurat dalam

menggambarkan perubahan karakteristik aliran saat fluida bergerak melalui domain, terutama di sekitar propeller. *Model Transition k-kl- ω* memungkinkan prediksi yang lebih baik tentang kapan dan bagaimana aliran akan bertransisi dari laminar ke turbulen, yang sangat penting untuk analisis performa propeller dan efisiensi aliran fluida secara keseluruhan.

Setting Boundary inlet menggunakan *laminar kinetic energy* yang sangat rendah, intensitas turbulensi sebesar 1%, transfer panas melalui *Static Temperature*, dan model turbulensi *Transition k-kl- ω* , simulasi CFD dapat menciptakan kondisi awal yang stabil dan akurat untuk aliran yang masuk. Pengaturan ini memastikan bahwa aliran masuk ke domain simulasi dalam kondisi yang diinginkan, memungkinkan transisi aliran yang halus dan memastikan hasil simulasi yang dapat diandalkan dan representatif dari kondisi nyata.

Tabel 4.5 Simulated Boundary Conditions

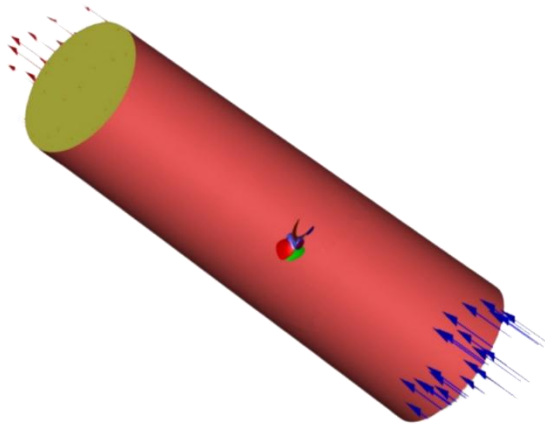
n (rps)	n (rpm)
25	1500
30	1800
40	2400
50	3000

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

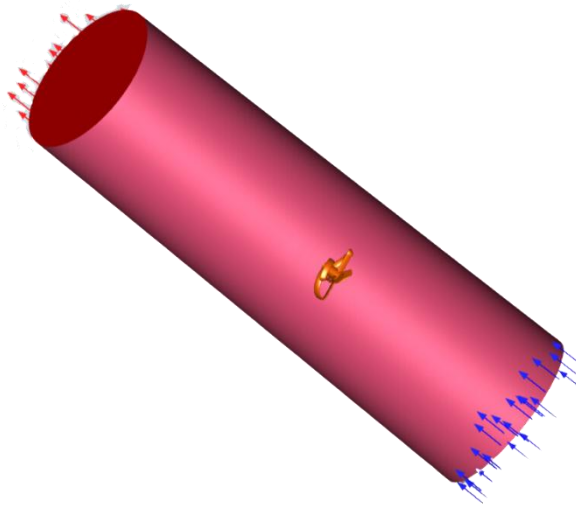
Tabel 4.5 menunjukkan kondisi batas yang disimulasikan untuk kecepatan rotasi pada domain yang berputar. Dalam tabel tersebut, kolom pertama menunjukkan kecepatan rotasi n dalam satuan rotasi per detik (rps), sedangkan kolom kedua menunjukkan kecepatan rotasi n dalam satuan rotasi per menit (rpm). Kecepatan rotasi yang tercantum adalah 25 rps (1500 rpm), 30 rps (1800 rpm), 40 rps (2400 rpm), dan 50 rps (3000 rpm). Kecepatan rotasi yang bervariasi ini memberikan gambaran tentang bagaimana sistem berperilaku di bawah berbagai kondisi operasi. Dalam konteks simulasi ini, kecepatan rotasi digunakan sebagai parameter untuk menguji dan memvalidasi performa serta respons dari domain yang berputar. Dengan mengatur kecepatan rotasi pada nilai-nilai tersebut, sehingga dapat mengevaluasi bagaimana perubahan kecepatan mempengaruhi dinamika sistem

b) Outlet

Kondisi batas keluar (*Outlet Boundary Condition*) adalah batas yang menentukan cara aliran fluida keluar dari domain simulasi pada sisi yang berfungsi sebagai batas keluar. Kondisi batas ini sangat penting untuk mensimulasikan kondisi keluar yang realistis dan memastikan bahwa hasil simulasi mencerminkan kondisi aliran yang sebenarnya. Beberapa bentuk umum dari kondisi batas keluar melibatkan parameter seperti kecepatan, tekanan, atau fraksi massa pada batas keluar.



Gambar 4.10 Inlet dan Outlet pada Propeller Wageningen B-Series



Gambar 4.11 Inlet dan Outlet pada *Toroidal Propeller*

Gambar 4.10, inlet dan outlet untuk propeller Wageningen B-Series ditunjukkan. Dalam simulasi CFD, tekanan outlet diatur dengan $P_{Out} = P_{Ref}$, memastikan fluida keluar dari domain simulasi secara realistis tanpa refleksi tekanan yang dapat mengganggu hasil. Kondisi tekanan ini menjaga integritas aliran dan memastikan simulasi meniru kondisi operasional sebenarnya, penting untuk memodelkan aliran fluida dan memprediksi kinerja propeller, termasuk efek kavitasi. Pada Gambar 4.11, inlet dan outlet untuk *Toroidal Propeller* ditunjukkan. Sama seperti propeller Wageningen B-Series, kondisi tekanan $P_{Out} = P_{Ref}$ diterapkan, memastikan aliran fluida keluar dari domain simulasi

secara realistis tanpa refleksi tekanan. Ini penting untuk meniru operasi *Toroidal Propeller* dalam kondisi nyata, termasuk aliran fluida melalui dan di sekitar propeller, serta memodelkan potensi kavitasi.

Tabel 4.4 *Boundary Physics*, *Boundary OUTLET* didefinisikan sebagai tipe *OUTLET* yang berlokasi pada *OUTLET*. Pada *Boundary outlet* didefinisikan sebagai bagian dari domain simulasi di mana fluida keluar dari sistem, biasanya berada di ujung domain simulasi yang bertujuan untuk memungkinkan fluida mengalir keluar secara bebas setelah melewati propeller. Pada *Boundary outlet*, metode spesifikasi arah aliran balik diatur *Normal to Boundary*. Ini berarti bahwa aliran balik akan tegak lurus terhadap batas outlet. Pengaturan ini penting untuk memastikan bahwa aliran keluar tidak terganggu oleh komponen aliran balik yang mungkin muncul karena perubahan kondisi di downstream.

Tekanan aliran balik di *outlet* ditetapkan sebagai *Total Pressure*, yang mencakup tekanan statis dan dinamis. Tekanan statis adalah tekanan yang dirasakan oleh fluida saat berada dalam keadaan diam, sedangkan tekanan dinamis dihasilkan oleh pergerakan fluida. Dengan mempertimbangkan tekanan total, simulasi dapat lebih akurat dalam menggambarkan kondisi aliran balik, memastikan bahwa semua komponen tekanan diambil ke dalam pertimbangan.

Metode spesifikasi *Normal to Boundary* memastikan bahwa arah aliran balik tegak lurus terhadap batas outlet, membantu mempertahankan stabilitas simulasi dan mengurangi kemungkinan ketidakstabilan numerik. Mempertimbangkan *Total Pressure* untuk aliran balik berarti bahwa baik tekanan statis maupun dinamis diakui dalam simulasi, memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kondisi aliran di outlet dan memastikan bahwa semua gaya yang bekerja pada fluida saat keluar dari domain diakomodasi dengan tepat.

Pengaturan nilai *laminar kinetic energy* yang sangat rendah ($1e-6 \text{ m}^2/\text{s}^2$) menunjukkan bahwa aliran balik di outlet berada dalam kondisi yang sangat tenang. Nilai ini sangat kecil, hampir mendekati kondisi tanpa aliran, yang berarti aliran balik tidak membawa banyak energi kinetik yang dapat mempengaruhi stabilitas aliran utama. Intensitas turbulensi sebesar 1% menggambarkan tingkat fluktuasi kecepatan yang sangat rendah dalam aliran balik, menunjukkan bahwa aliran balik memiliki sedikit sekali turbulensi, menjaga kondisi aliran yang stabil dan membantu menghindari gangguan signifikan pada aliran keluar dari domain.

Setting Boundary outlet menggunakan metode spesifikasi *Normal to Boundary*, *Total Pressure* untuk tekanan aliran balik, nilai *laminar kinetic energy* yang sangat rendah ($1e-6 \text{ m}^2/\text{s}^2$), dan intensitas turbulensi yang rendah (1%), simulasi CFD dapat menciptakan kondisi aliran yang stabil dan akurat di outlet. Pengaturan ini memastikan bahwa aliran balik tidak mengganggu aliran utama dan membantu mempertahankan stabilitas simulasi secara keseluruhan, yang sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diandalkan dan representatif dari kondisi nyata.

c) Wall

Tabel 4.4 Dalam simulasi propeller, berbagai kondisi batas dan model fisik diterapkan untuk memastikan hasil simulasi yang akurat dan realistis. Pertama, *Boundary WALL* ditetapkan sebagai tipe WALL dan berlokasi pada WALL. Pengaturan untuk mass and momentum di *Boundary* ini adalah Slip Wall, yang memungkinkan sedikit pergerakan dinding relatif terhadap fluida, mengurangi gaya gesekan pada permukaan dinding. Kekasaran dinding diatur sebagai *Smooth Wall*, yang berarti permukaan dinding dianggap halus tanpa kekasaran, mengurangi gangguan pada aliran fluida yang mengalir di dekat dinding. Domain statis dari dinding luar dikenakan kondisi simetri (*symmetry Conditions*), yang mengasumsikan bahwa aliran fluida pada bidang simetri adalah identik di kedua sisinya, sehingga aliran dapat melintas tanpa hambatan atau refleksi. Sementara itu, dinding propeller ditetapkan menggunakan kondisi *no-slip (no-slip condition)*, di mana kecepatan fluida pada permukaan propeller adalah nol relatif terhadap permukaan propeller, mencerminkan gesekan penuh antara fluida dan permukaan propeller. Pada domain yang berputar, gerak domain diatur untuk berputar dengan kecepatan sudut tertentu, mensimulasikan rotasi propeller dalam fluida. Selain domain yang berputar, gerakan diam diterapkan pada domain tetap, yang artinya bagian ini tidak bergerak dan hanya dipengaruhi oleh aliran fluida yang disebabkan oleh propeller.

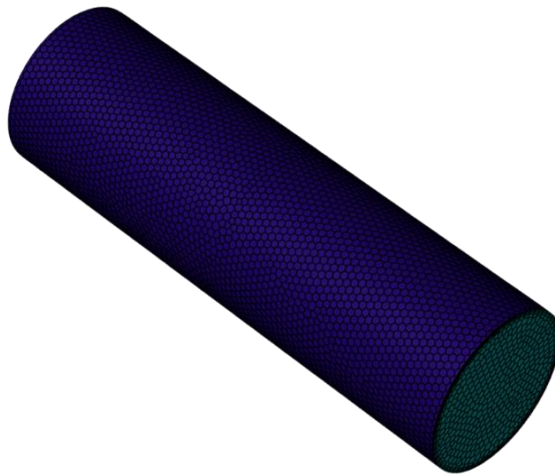
Upaya menangani aliran turbulen transisi, model turbulen *viscous Transition k-kl- ω* diterapkan pada langkah awal simulasi. Model ini digunakan untuk menangani transisi aliran dari laminar ke turbulen secara lebih akurat, yang penting untuk prediksi performa propeller yang lebih tepat. Selanjutnya, diterapkan model campuran multifase (*multiphase mixture*) yang melibatkan persamaan Zwart-Gerber-Belamri untuk menjelaskan pertumbuhan dan kolaps gelembung kavitasi dalam fluida. Persamaan Zwart-Gerber-Belamri mempertimbangkan faktor-faktor seperti tekanan, tegangan permukaan, dan densitas fluida, membantu dalam memprediksi pembentukan gelembung kavitasi yang dapat mempengaruhi kinerja dan integritas propeller. Pendekatan ini memastikan bahwa simulasi mencerminkan kondisi aliran fluida yang sesungguhnya, termasuk efek kavitasi, yang sangat penting untuk menganalisis kinerja dan keandalan propeller secara menyeluruh.

C. Meshing

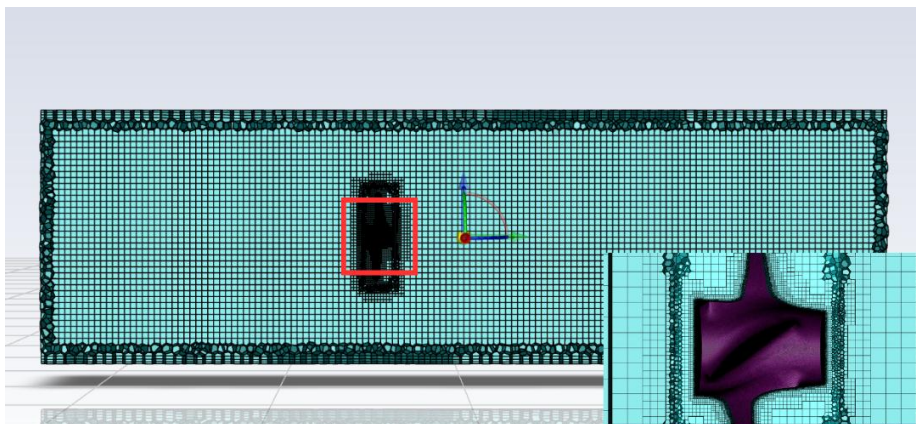
Jenis meshing yang diunggulkan untuk propeler adalah dengan menggunakan *Grid* tak terstruktur (*unstructured Grid*) dan mesh hibrida (*hybrid mesh*) dengan bentuk *mesh hibrida poly-hexcore*. Untuk menghasilkan *unstructured Grid* dengan sel hibrida, digunakan perangkat lunak *software* berbasis CFD untuk pembuatan *Grid*. Seperti yang disimpulkan oleh Morgut dan Nobile [25], jenis meshing ini lebih disukai karena mesh hibrida memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam prediksi numerik kinerja propulsi. Selain itu, penggunaan mesh hibrida memerlukan usaha yang lebih sedikit dalam pembuatannya dibandingkan dengan penggunaan mesh hexa-terstruktur. *Grid* dibuat dengan memperhatikan bahwa ukuran sel di dekat dinding bilah adalah kecil, sementara ukuran sel tersebut meningkat menuju batas luar domain (*outer Boundary*). Dalam penelitian ini, bagian domain yang berputar (*rotating domain*) dan yang tetap (*fixed domain*) dipisahkan. Mesh menggunakan solver dari *software* berbasis CFD seperti dalam Gambar 4.12 sampai Gambar 4.15.

Inisialisasi domain untuk bagian yang berputar disetel dengan metode otomatis, sementara domain yang tetap dibentuk menggunakan metode *poly-hexcore*. Antarmuka (*interface*) antara bagian yang berputar dan yang tetap dapat digabungkan dengan menggunakan “*wall to internal*” yang tersedia dalam solver *software* berbasis CFD

Guna meminimalkan jumlah elemen mesh dan meningkatkan kepadatan mesh, Penulis menerapkan penentuan ukuran mesh dengan memilih *body of influence/Local sizing* untuk mendekati akurasi yang lebih baik untuk bagian yang kritis penulis menggunakan fitur *local sizing* pada mesh permukaan propeller dikarenakan bagian ini membutuhkan akurasi yang detail.



Gambar 4.12 *Mesh Hibrida Poly-Hexcore* Untuk Domain Statik pada Propeller Wageningen B-Series

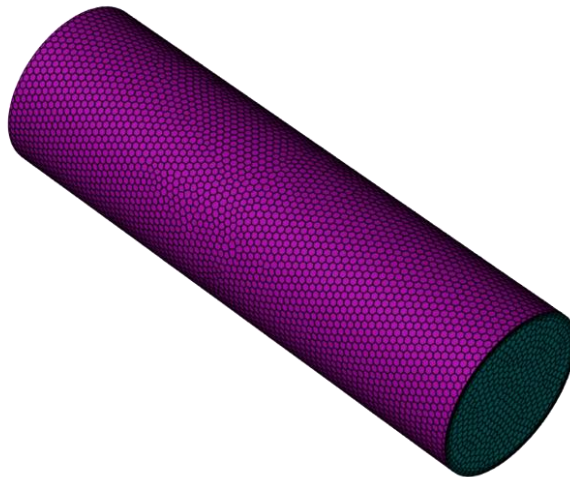


Gambar 4.13 *Mesh Hibrida Poly-Hexcore* Untuk Domain Berputar Menggunakan *Local Sizing* pada Propeller Wageningen B-Series

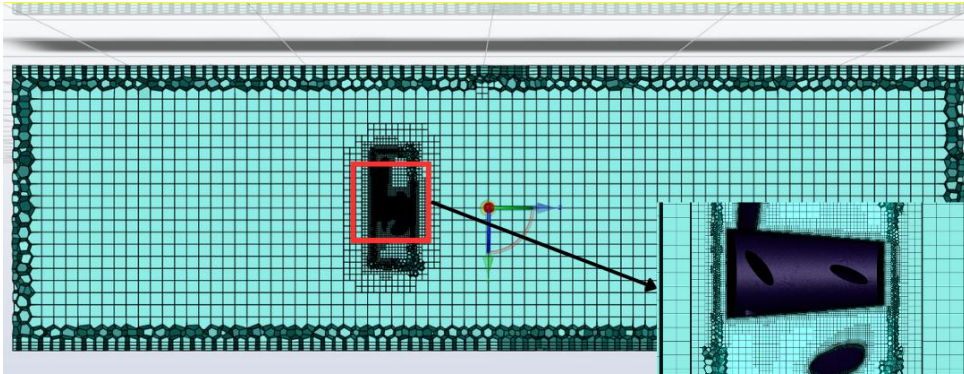
Gambar 4.12 menunjukkan aplikasi *mesh hibrida poly-hexcore* pada domain statik (fixed domain) yang mengelilingi propeller Wageningen B-Series. Mesh ini

menggunakan kombinasi *Grid* tak terstruktur (*unstructured Grid*) dan sel-sel hibrida yang memanfaatkan bentuk poligonal dan heksagonal untuk memberikan hasil yang lebih akurat dalam simulasi CFD. Penggunaan *mesh hibrida poly-hexcore* disukai karena mampu meningkatkan akurasi prediksi numerik kinerja propulsi dengan cara yang efisien. Dalam domain statik, perhatian khusus diberikan pada ukuran sel di dekat dinding bilah propeller, yang dibuat sangat kecil untuk menangkap detail aliran dengan presisi tinggi. Ukuran sel meningkat secara bertahap menuju batas luar domain, memungkinkan simulasi yang lebih efisien dengan jumlah elemen yang lebih sedikit tanpa mengorbankan akurasi. Pendekatan ini memastikan bahwa perubahan kecepatan dan tekanan yang signifikan di dekat permukaan propeller terukur dengan baik, sementara di area yang lebih jauh, sel yang lebih besar digunakan untuk mengurangi kompleksitas komputasi.

Gambar 4.13 memperlihatkan *mesh hibrida poly-hexcore* yang diterapkan pada domain berputar (*rotating domain*) di sekitar propeller *Wageningen B-Series*, dengan penggunaan fitur *local sizing*. Dalam domain berputar ini, mesh disusun dengan sangat rinci di area kritis, terutama di sekitar bilah propeller, yang memerlukan akurasi tinggi untuk menangkap fenomena aliran yang kompleks dan dinamis. Fitur *local sizing* memungkinkan penentuan ukuran mesh yang lebih halus dan detail di sekitar permukaan propeller. Bagian ini mengalami perubahan kecepatan dan tekanan yang signifikan saat berputar, sehingga memerlukan kepadatan mesh yang lebih tinggi untuk memastikan akurasi dalam prediksi aliran. Dengan menggunakan *local sizing*, mesh dapat diatur lebih padat di area kritis tanpa meningkatkan jumlah elemen secara berlebihan, sehingga menjaga efisiensi komputasi.



Gambar 4.14 *Mesh Hibrida Poly-Hexcore* Untuk Domain Statik pada *Toroidal Propeller*



Gambar 4.15 *Mesh Hibrida Poly-Hexcore Untuk Domain Berputar Menggunakan Local Sizing pada Toroidal Propeller*

Gambar 4.14 menunjukkan *mesh hibrida poly-hexcore* yang digunakan untuk domain statik pada *Toroidal Propeller*. Domain statik, atau domain tetap, dibentuk menggunakan metode *poly-hexcore* yang menggabungkan sel polihedral dan heksagonal. Metode ini memungkinkan pembentukan mesh yang kompleks dengan efisiensi tinggi. Ukuran sel-sel mesh diatur dengan cermat untuk memastikan bahwa sel-sel di dekat dinding bilah propeller cukup kecil untuk menangkap detail aliran yang kompleks di sekitar permukaan propeller. Ini penting karena interaksi aliran dengan permukaan propeller sangat mempengaruhi kinerja propulsi. Bagian luar domain, atau outer *Boundary*, memiliki ukuran sel yang lebih besar. Pendekatan ini dirancang untuk mengurangi jumlah total elemen *mesh*, yang pada gilirannya mempercepat waktu komputasi. Dengan memperbesar ukuran sel di area yang kurang kritis, sumber daya komputasi dapat difokuskan pada area penting di sekitar bilah propeller, memastikan simulasi berjalan lebih efisien tanpa mengorbankan akurasi di area yang krusial.

Gambar 4.15 menunjukkan *mesh hibrida poly-hexcore* yang digunakan untuk domain berputar (*rotating domain*) pada *Toroidal Propeller*, dengan tambahan penggunaan *local sizing* untuk meningkatkan akurasi. Domain berputar diinisialisasi menggunakan metode otomatis yang tersedia dalam solver perangkat lunak CFD, yang memungkinkan domain ini beradaptasi dengan kondisi operasi dinamis propeller. Untuk meminimalkan jumlah elemen mesh dan meningkatkan kepadatan mesh di area yang penting, *local sizing* diterapkan. *Local sizing* memungkinkan ukuran mesh disesuaikan agar lebih kecil dan lebih padat di bagian yang kritis, terutama di sekitar permukaan propeller. Permukaan propeller adalah area yang membutuhkan akurasi yang sangat detail karena perubahan kecil dalam aliran di sekitar bilah dapat secara signifikan mempengaruhi performa propeller. Dengan menggunakan *local sizing*, mesh di sekitar bilah propeller dibuat lebih halus, yang berarti sel-sel mesh di area ini lebih kecil dan lebih rapat. Hal ini memastikan bahwa detail aliran dan fenomena turbulensi dapat ditangkap dengan lebih baik, menghasilkan prediksi numerik yang lebih akurat mengenai kinerja propulsi. Mesh yang lebih rapat di area kritis membantu dalam memodelkan aliran dengan lebih detail dan mengurangi kemungkinan kesalahan dalam simulasi.

D. Cell Zone

Simulasi melibatkan dua fase, yaitu fase *Water Liquid* dan *Water Vapor*, menggambarkan aliran fluida dalam bentuk cair dan uap. Domain yang berputar diatur dengan kecepatan sudut (*Angular Velocity*), memperhitungkan rotasi propeler dalam simulasi. *Model multiphase* yang digunakan adalah *Mixture*, menunjukkan adanya campuran antara fase cair dan uap dalam sistem.

E. Setting Parameter

Perangkat lunak CFD yang tersedia secara komersial, *software* berbasis CFD digunakan untuk menyelesaikan: *three-dimensional viscous, unsteady, cavitating problem*. Persamaan-persamaan diselesaikan sebagai berikut:

- Komponen tekanan dan kecepatan dipecahkan menggunakan *coupled technique*.
- Skema *First Order Upwind* diterapkan untuk istilah konveksi dalam semua *transport equations*.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat komputer di laboratorium komputer Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan pengaturan simulasi ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 4.6 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	$3.170 \times 10^3 \text{ Pa}$
Pressure Link	Couple
Pressure	Standard
Momentum and Turbulence Parameters	First Order Upwind
Solver	Unsteady

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

4.2.2 Solver manager

Solver Manager, menurut Versteeg dan Malalasekera, adalah tahap inti di mana perhitungan numerik dilakukan dengan menyelesaikan persamaan aliran yang telah didiskritisasi menggunakan metode volume hingga. Pada tahap ini, solver mengelola persamaan kontinuitas, momentum, energi, dan, jika diperlukan, persamaan turbulensi atau transfer panas. *Solver* juga bertanggung jawab atas metode penyelesaian persamaan, baik secara iteratif atau langsung. Stabilitas numerik dan

konvergensi solusi sangat bergantung pada pemilihan skema diskritisasi dan metode penyelesaian yang digunakan (Versteeg & Malalasekera, 2007).

A. Pressure-Velocity Coupling

Pressure-Velocity Coupling adalah teknik yang digunakan dalam simulasi CFD untuk memastikan solusi kecepatan dan tekanan dalam aliran fluida saling konsisten. Metode ini penting karena persamaan yang menggambarkan aliran fluida mengandung komponen tekanan dan kecepatan yang saling terkait. Terdapat beberapa metode untuk coupling ini:

1. *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)*:
Metode SIMPLE memperkirakan nilai tekanan baru berdasarkan solusi sebelumnya dan kemudian menyesuaikan kecepatan agar konsisten dengan tekanan baru tersebut. Metode ini stabil dan mudah diterapkan, cocok untuk aliran dengan kondisi steady-state. Namun, konvergensinya lebih lambat pada aliran yang sangat kompleks atau transien.
2. *SIMPLER (SIMPLE Revised)*
algoritma SIMPLER (SIMPLE Revised) merupakan perbaikan dari metode SIMPLE. Pada SIMPLER, persamaan kontinuitas digunakan untuk menyusun persamaan tekanan secara langsung, bukan melalui koreksi tekanan seperti di SIMPLE. Ini menghasilkan tekanan yang lebih akurat sejak awal. Meski begitu, kecepatan masih diperoleh melalui koreksi kecepatan, mirip dengan metode SIMPLE, sehingga tetap mempertahankan efisiensi perhitungan dan akurasi hasil simulasi.
3. *SIMPLEC (SIMPLE-Consistent)*:
SIMPLEC adalah variasi dari SIMPLE yang meningkatkan konvergensi dengan memodifikasi koreksi tekanan. Ini mengurangi jumlah iterasi yang diperlukan untuk mencapai konvergensi. SIMPLEC lebih cepat dibandingkan SIMPLE dalam beberapa kasus, terutama pada aliran dengan perubahan tekanan signifikan. Namun, mungkin kurang stabil dalam beberapa kasus.
4. *PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)*:
Metode PISO dirancang untuk simulasi aliran transien. Dengan menggunakan beberapa langkah koreksi tekanan dalam setiap iterasi waktu, metode ini meningkatkan akurasi dan stabilitas. PISO sangat efisien dan akurat untuk aliran yang tidak stabil atau transien, tetapi lebih kompleks dan memerlukan lebih banyak sumber daya komputasi.
5. *Coupled*:
Metode coupled menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas secara simultan sebagai satu set persamaan tersambung. Ini memberikan akurasi yang lebih tinggi dan konvergensi lebih cepat dalam banyak kasus. Metode coupled sangat efektif untuk aliran kompleks dan berkecepatan tinggi, tetapi memerlukan lebih banyak memori dan sumber daya komputasi. Perhitungan detail algoritma *coupled* dalam *solver* CFD melibatkan pemecahan simultan dari persamaan momentum dan kontinuitas. Algoritma *coupled* menyelesaikan seluruh sistem persamaan yang saling terkait pada setiap langkah iterasi secara bersamaan, berbeda dengan pendekatan metode SIMPLE atau PISO yang memecah

persamaan secara independent (memisahkan penyelesaian tekanan dan kecepatan).

a) Schame

Simulasi CFD untuk menganalisis aliran fluida di sekitar propeller penulis menggunakan skema "*Couple*" digunakan untuk menghubungkan dan menyelesaikan persamaan momentum dan tekanan secara bersamaan. Penggunaan skema ini memiliki beberapa alasan penting. Pertama, skema Couple menawarkan stabilitas numerik yang lebih baik dibandingkan dengan skema segregated. Dalam simulasi propeller, aliran fluida sangat kompleks dengan interaksi kuat antara tekanan dan kecepatan. Dengan menyelesaikan persamaan ini secara bersamaan, skema Couple mengurangi kesalahan iteratif yang dapat terjadi ketika persamaan diselesaikan secara terpisah, sehingga memastikan stabilitas solusi yang lebih tinggi. Kedua, skema Couple biasanya memberikan konvergensi yang lebih cepat. Karena persamaan momentum dan tekanan diselesaikan bersama-sama, solusi dapat dicapai dalam waktu iterasi yang lebih sedikit, menghemat waktu komputasi. Dalam simulasi propeller, yang sering kali membutuhkan banyak iterasi untuk mencapai hasil yang stabil, kecepatan konvergensi ini sangat bermanfaat. Ketiga, dengan menghubungkan persamaan tekanan dan momentum secara simultan, skema Couple dapat menangkap interaksi yang lebih halus antara aliran fluida dan struktur propeller. Ini menghasilkan distribusi tekanan dan kecepatan yang lebih akurat di sekitar propeller, yang penting untuk analisis performa dan desain propeller yang efisien. Keempat, dalam kasus aliran berputar, turbulen, dan transisi seperti di sekitar propeller, skema Couple lebih efektif dalam menangani perubahan aliran yang cepat dan kompleks. Skema ini mampu menangani aliran dengan gradien yang curam dan variasi tekanan yang cepat dengan lebih efisien, memastikan bahwa fenomena fisik yang kompleks dapat dimodelkan dengan lebih akurat. Penggunaan skema Couple dalam simulasi CFD untuk propeller dipilih karena kemampuannya memberikan stabilitas numerik yang lebih baik, konvergensi yang lebih cepat, dan akurasi yang lebih tinggi dalam menangkap interaksi antara tekanan dan kecepatan. Skema ini sangat cocok untuk menangani aliran kompleks di sekitar propeller, memastikan bahwa simulasi menghasilkan prediksi performa yang akurat dan dapat diandalkan.

B. Spatial Discretization

Spatial Discretization adalah proses numerik dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang mengubah persamaan diferensial parsial yang menggambarkan aliran fluida menjadi persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara numerik. di Software berbasis CFD, spatial discretization mencakup berbagai skema yang digunakan untuk menghitung variabel aliran seperti kecepatan, tekanan, dan energi pada *Grid* mesh. Berikut adalah penjelasan rinci tentang berbagai metode spatial discretization yang tersedia di Software berbasis CFD:

1. First Order Upwind

Skema *First Order Upwind* menggunakan nilai variabel dari sel upstream (hulu) untuk menghitung fluks di permukaan sel. Ini adalah pendekatan yang

relatif sederhana dan stabil. Kelebihan utama dari skema ini adalah stabilitasnya yang tinggi dan kemudahan implementasinya, sehingga cocok untuk simulasi awal atau ketika stabilitas numerik sangat penting. Namun, skema ini memiliki akurasi yang rendah karena hanya menggunakan informasi dari satu arah aliran, yang dapat menyebabkan difusi numerik yang signifikan, terutama dalam aliran dengan gradien tajam.

2. *Second Order Upwind*

Skema *Second Order Upwind* menggunakan informasi dari dua sel upstream untuk meningkatkan akurasi dengan mempertimbangkan gradien variabel. Ini lebih akurat daripada skema *First Order Upwind* karena mengurangi difusi numerik dan memberikan hasil yang lebih halus dan realistis. Namun, skema ini lebih kompleks dan memerlukan lebih banyak sumber daya komputasi, serta bisa kurang stabil dibandingkan dengan skema *First Order Upwind*.

3. *QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)*

Skema *QUICK* menggunakan interpolasi kuadratik untuk menghitung fluks di permukaan sel, yang meningkatkan akurasi dalam menangani aliran dengan gradien tajam. Kelebihannya adalah memberikan hasil yang sangat akurat untuk aliran dengan gradien tajam dan mengurangi difusi numerik lebih baik daripada skema *Second Order Upwind*. Namun, skema ini lebih kompleks dan memerlukan lebih banyak sumber daya komputasi serta bisa menjadi **kurang stabil dalam aliran yang sangat turbulen**.

a) *Pressure*

Simulasi CFD untuk menganalisis aliran fluida di sekitar propeller, algoritma *PRESTO (Pressure STaggering Option)* digunakan untuk diskritisasi tekanan karena beberapa alasan penting. Pertama, algoritma ini dirancang untuk menangani gradien tekanan yang tajam dengan akurasi tinggi. Pada simulasi propeller, gradien tekanan tajam sering terjadi di sekitar bilah propeller dan di daerah wake (jejak) di belakang propeller, sehingga algoritma *PRESTO* memastikan bahwa distribusi tekanan yang dihasilkan lebih realistis dan bebas dari osilasi numerik. Selain itu, penggunaan *PRESTO* meningkatkan stabilitas dan konvergensi simulasi. Dalam aliran yang kompleks dan berputar seperti di sekitar propeller, interaksi antara kecepatan dan tekanan sangat kuat. Algoritma *PRESTO* membantu mengurangi kemungkinan terjadinya osilasi numerik dan memastikan solusi konvergen lebih cepat dan stabil. Kemampuan *PRESTO* untuk bekerja dengan baik pada mesh yang tidak beraturan atau hybrid juga menjadi alasan penting. Mesh semacam ini sering digunakan untuk menangkap detail geometris yang kompleks di sekitar propeller. Algoritma *PRESTO* memastikan bahwa diskritisasi tekanan tetap akurat dan stabil meskipun pada mesh yang kompleks. Terakhir, tekanan merupakan parameter kritis yang mempengaruhi performa dan efisiensi propeller. Pengaturan tekanan yang akurat membantu dalam menganalisis gaya dorong (*Thrust*), momen puntir (*Torque*), dan fenomena kavitasi. Algoritma *PRESTO* membantu memastikan bahwa prediksi tekanan mendekati kondisi nyata, sehingga analisis performa propeller menjadi lebih dapat diandalkan.

b) *Momentum and Turbulence Parameters*

Simulasi CFD untuk menganalisis aliran fluida di sekitar propeller, skema "*First Order Upwind*" digunakan untuk diskritisasi persamaan momentum dan parameter turbulensi karena beberapa alasan penting. Pertama, skema first order upwind terkenal karena stabilitasnya. Dalam simulasi propeller, di mana aliran fluida sangat kompleks dengan gradien tajam dan perubahan aliran yang cepat, stabilitas numerik sangat penting untuk menghindari osilasi numerik dan kesalahan dalam solusi. Skema ini memastikan solusi tetap stabil meskipun pada mesh yang kasar atau ketika kondisi aliran berubah dengan cepat.

Kedua, skema first order upwind cenderung memiliki konvergensi yang lebih cepat dibandingkan dengan skema orde yang lebih tinggi. Karena skema ini lebih sederhana, membutuhkan lebih sedikit iterasi untuk mencapai solusi yang stabil. Dalam konteks simulasi propeller, ini berarti hasil dapat diperoleh dalam waktu komputasi yang lebih singkat, yang sangat berguna dalam fase awal analisis.

Ketiga, meskipun skema first order upwind memiliki akurasi lebih rendah dibandingkan dengan skema higher-order, skema ini mengurangi risiko kesalahan numerik yang dapat timbul dari osilasi solusi. Dalam simulasi aliran turbulen di sekitar propeller, di mana prediksi yang stabil dan dapat diandalkan lebih diutamakan daripada akurasi yang sangat tinggi, skema ini menjadi pilihan yang baik.

Keempat, skema first order upwind lebih sederhana dalam implementasinya dan memerlukan lebih sedikit sumber daya komputasi dibandingkan dengan skema orde yang lebih tinggi. Ini membuatnya sangat efisien untuk digunakan dalam simulasi awal atau dalam simulasi yang memerlukan banyak iterasi untuk mencapai solusi yang stabil.

Terakhir, dalam simulasi propeller, aliran fluida sering memiliki gradien yang tajam, terutama di sekitar bilah propeller dan di daerah wake. Skema first order upwind, dengan stabilitasnya yang baik, mampu menangani gradien tajam ini tanpa menyebabkan osilasi numerik yang tidak diinginkan. Penggunaan skema first order upwind untuk diskritisasi persamaan momentum dan parameter turbulensi dalam simulasi CFD propeller dipilih karena stabilitas numeriknya yang tinggi, konvergensi yang lebih cepat, dan kemampuannya untuk mengurangi kesalahan numerik. Skema ini sederhana dan efisien, menjadikannya pilihan yang baik untuk menangani aliran kompleks dengan gradien tajam di sekitar propeller, serta memastikan bahwa simulasi menghasilkan solusi yang stabil dan dapat diandalkan.

4.2.3 *Post-Processor*

Tahap akhir dalam simulasi CFD adalah *Post-Processor*, yang digunakan untuk menganalisis dan memvisualisasikan hasil simulasi. Versteeg dan Malalasekera menjelaskan bahwa pada tahap ini, data yang dihasilkan dari simulasi seperti distribusi tekanan, kecepatan, dan suhu diproses menjadi grafik, diagram, atau visualisasi aliran. *Post-Processor* membantu memahami pola aliran dan mengevaluasi kinerja desain yang disimulasikan. Dengan alat visualisasi ini, pengguna dapat mendeteksi fenomena

seperti aliran turbulen atau kavitasi pada propeller, yang penting untuk analisis mendalam (Versteeg & Malalasekera, 2007).

4.3 Validasi data hasil *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Guna memastikan bahwa data yang muncul setelah simulasi dapat dikatakan benar, diperlukan 2 metode validasi. Proses validasi meliputi:

4.3.1 *Grid Independence*

Grid Independence merupakan langkah esensial dalam memvalidasi hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Proses ini terdiri dari menjalankan simulasi dengan berbagai ukuran mesh yang berbeda dan kemudian menganalisis hasilnya untuk mendeteksi perbedaan yang signifikan di antara ukuran mesh tersebut. Jika hasil simulasi tidak menunjukkan perubahan yang signifikan ketika ukuran mesh diperhalus, hal ini menunjukkan bahwa solusi telah mencapai *Grid independence*. Keakuratan hasil perhitungan CFD sangat bergantung pada jumlah dan ukuran mesh yang digunakan. Mesh yang kasar atau dengan sedikit elemen mungkin mempercepat waktu simulasi, tetapi hasilnya cenderung kurang akurat karena tidak mampu menangkap detail aliran dengan baik. Sebaliknya, mesh yang lebih halus dengan banyak elemen dapat memberikan hasil yang lebih akurat namun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama. Oleh karena itu, simulasi dianggap optimal ketika mampu memberikan hasil yang akurat dengan waktu komputasi yang efisien.

Parameter utama yang dianalisis oleh penulis pada *Grid Independence Test* adalah *Thrust* yang dihasilkan oleh propeller. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi perubahan atau perbedaan hasil antara satu tingkat *Grid* dan tingkat *Grid* berikutnya terhadap *Thrust* yang dihasilkan oleh propeller. Pada awalnya penulis menggunakan *Grid* kasar, yang memiliki elemen *Grid* berukuran besar dan jumlah elemen yang relatif sedikit. Simulasi awal dijalankan dengan *Grid* kasar ini untuk mendapatkan gambaran umum tentang hasil yang diharapkan. Setelah itu, *Grid* diperhalus secara bertahap, yaitu dengan membagi elemen *Grid* menjadi elemen yang lebih kecil dan menambah jumlah elemen keseluruhan. Setiap kali *Grid* diperhalus, simulasi dijalankan kembali dan hasilnya dianalisis. Proses refinement ini dapat dilakukan secara lokal pada daerah-daerah dengan gradien medan yang tinggi atau secara keseluruhan pada seluruh domain.

Grid dianggap mencapai independence ketika perbandingan hasil simulasi dari berbagai ukuran mesh dan menentukan hasil *Thrust* yang dihasilkan oleh propeller antara dua ukuran mesh berturut-turut kurang dari 2%. Setelah mencapai *Grid independence* dan menandakan bahwa hasil simulasi telah konvergen dan tidak lagi bergantung pada ukuran atau resolusi *Grid* yang digunakan.

Tabel 4.7 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 4.8 Grid Independence Test Toroidal Propeller

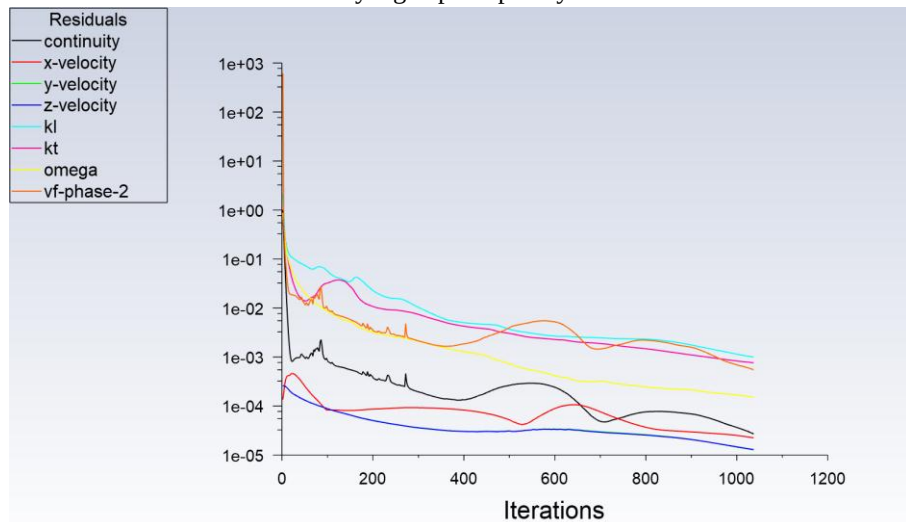
No	Total Number of Elements	Thrust (N)	Selisih %	Running Time
1	2.027.164	686	-	2 jam 40 menit
2	2.306.268	672	-2.04%	3 jam 21 menit
3	2.907.152	664	-1.19%	3 jam 53 menit
4	3.384.040	654	-1.51%	4 jam 43 menit
5	3.829.265	654	0%	6 jam 17 menit
6	4.635.996	656	0.31%	7 jam 8 menit

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

4.3.2 Convergence

konvergensi adalah tahap di mana hasil simulasi mendekati solusi yang benar atau stabil secara numerik. Proses ini melibatkan perhitungan berulang menggunakan metode numerik untuk mendapatkan solusi yang akurat. Konvergensi diukur dengan memantau nilai residual, yang merupakan ukuran dari kesalahan antara hasil perhitungan aktual dan nilai yang diharapkan. Dalam konteks CFD, simulasi akan terus berjalan hingga mencapai kondisi konvergensi. Proses ini dipandu oleh dua kriteria utama: nilai residual dan jumlah iterasi. Nilai residual adalah ukuran dari seberapa besar kesalahan yang masih ada dalam simulasi, sedangkan jumlah iterasi adalah jumlah langkah perhitungan yang diperlukan untuk mencapai solusi yang akurat. Kompleksitas model yang digunakan sangat memengaruhi proses konvergensi. Model dengan detail yang kompleks, seperti geometri yang rumit atau aliran yang bersifat turbulen, memerlukan jumlah *Grid* yang lebih besar untuk merepresentasikan fenomena aliran dengan baik. Semakin banyak *Grid* yang digunakan, semakin rumit dan memakan waktu proses perhitungan, karena setiap titik *Grid* harus dievaluasi dalam setiap iterasi. Namun, peningkatan jumlah *Grid* tidak selalu meningkatkan akurasi simulasi secara proporsional. Terkadang, tambahan *Grid* hanya menyebabkan peningkatan nilai residual yang kecil atau bahkan tidak ada, yang menunjukkan bahwa solusi sudah mencapai titik konvergensi yang memadai. Oleh karena itu, pemantauan konvergensi dan pengoptimalan jumlah *Grid* adalah aspek penting dalam simulasi CFD. Dengan demikian, konvergensi dalam simulasi CFD membutuhkan keseimbangan antara kompleksitas model, jumlah *Grid*, nilai residual, dan jumlah iterasi untuk mencapai solusi yang akurat dengan efisien. Ini melibatkan

pemilihan parameter simulasi yang tepat dan pemantauan yang cermat selama proses simulasi untuk memastikan hasil yang dapat dipercaya.



Gambar 4.16 Konvergensi Pada Simulasi CFD Sebesar 10^{-2}

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), konvergensi adalah tahap di mana solusi numerik telah mendekati atau mencapai keadaan yang stabil dan akurat. Proses mencapai konvergensi diawasi dengan mengamati nilai residual, yang merupakan ukuran dari kesalahan antara hasil perhitungan aktual dengan nilai yang diharapkan. Semakin rendah nilai residualnya, semakin mendekati solusi yang akurat. Dalam konteks ini, batas konvergensi telah ditetapkan pada 10^{-2} , yang berarti simulasi dianggap telah konvergen saat nilai residual turun di bawah ambang batas ini. Selain itu, batasan maksimal iterasi juga ditetapkan sebesar 20.000. Artinya, simulasi akan berhenti jika salah satu dari dua kondisi terpenuhi: nilai residual turun di bawah 10^{-2} atau jumlah iterasi mencapai 20.000. Pada gambar 4.16, terjadi penurunan nilai residual di bawah 10^{-2} pada iterasi ke-1037. Ini menandakan bahwa solusi telah mencapai tingkat konvergensi yang diinginkan sebelum mencapai batas maksimal iterasi. Dengan kata lain, solusi sudah cukup stabil dan akurat untuk diterima. Proses simulasi dihentikan pada titik ini karena telah memenuhi kriteria konvergensi yang ditetapkan sebelumnya. Dengan demikian, hasil dari simulasi tersebut dapat dianggap sebagai solusi yang dapat dipercaya untuk masalah yang dianalisis. Dalam prakteknya, mencapai konvergensi yang memadai penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi mencerminkan perilaku aliran fluida yang sesuai dengan kondisi fisik yang sebenarnya.

4.4 Hasil Simulasi

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

Hasil simulasi yang telah dilakukan 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 4.9 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 4.10 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

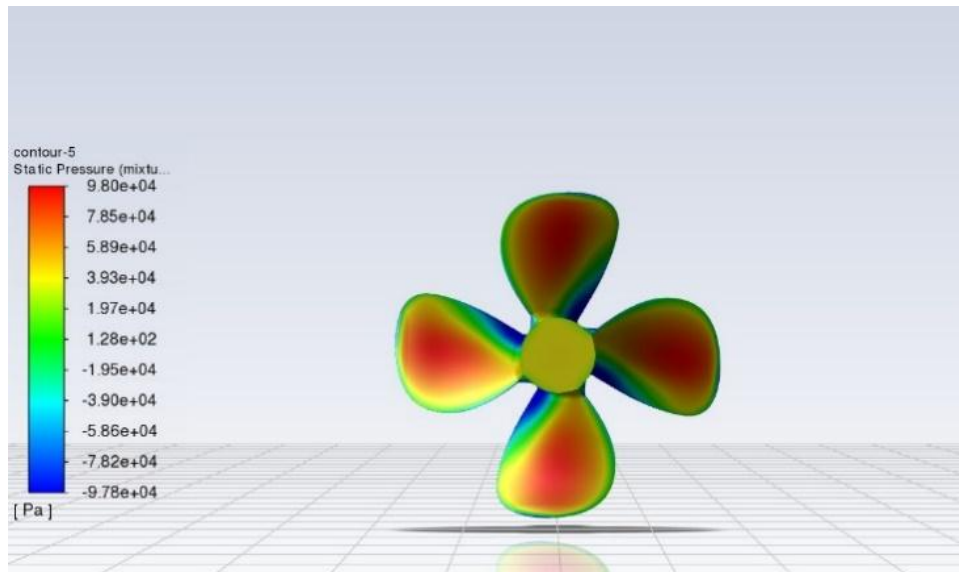
Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024

Tabel 4.9, hasil simulasi propeller B-Series menunjukkan nilai *Thrust* dan *Torque* yang dihasilkan oleh propeller tersebut. *Thrust* mengukur kemampuan propeller dalam menghasilkan gaya dorong, sedangkan *Torque* mengukur resistensi terhadap rotasi propeller. *Thrust* yang lebih tinggi menunjukkan propeller mampu menghasilkan daya dorong yang besar, sementara *Torque* yang lebih rendah menunjukkan bahwa propeller memerlukan lebih sedikit energi untuk berputar.

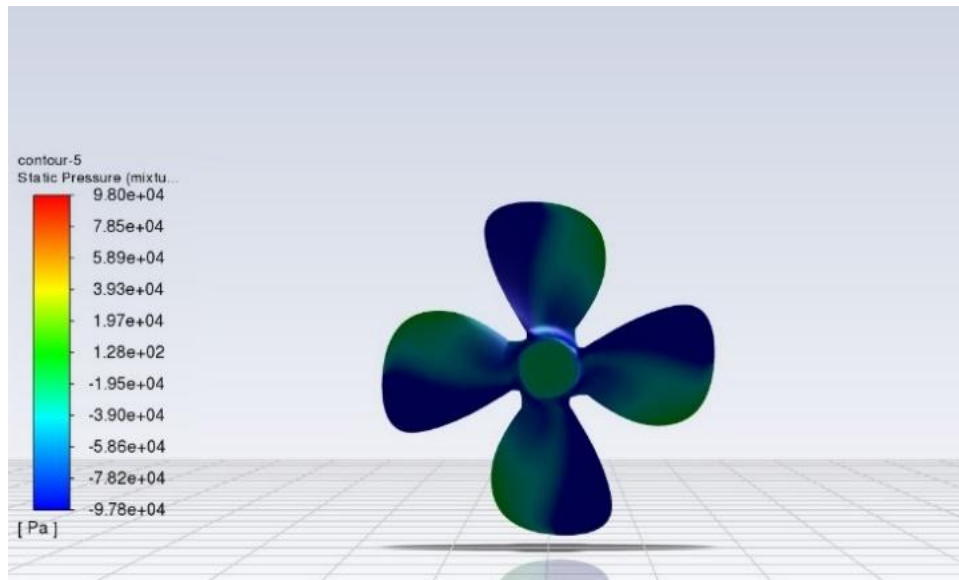
Tabel 4.10, hasil simulasi *Toroidal Propeller* menunjukkan nilai *Thrust* dan *Torque* yang dihasilkan. Sama seperti pada propeller B-Series, *Thrust* mengukur daya dorong yang dihasilkan dan *Torque* mengukur resistensi terhadap rotasi. Analisis *Thrust* dan *Torque* pada *Toroidal Propeller* juga menghasilkan rasio T/Q yang digunakan untuk menilai efisiensi propeller tersebut. Membandingkan rasio T/Q antara propeller B-Series dan *Toroidal Propeller* membantu menentukan propeller mana yang lebih efisien dalam mengkonversi energi input menjadi *Thrust*.

4.4.2 Hasil Contour (Static Pressure, Dynamic Pressure dan Total Pressure) pada Simulasi Propeller Wageningen B-Series dan Toroidal Propeller

A. Propeller Wageningen B-Series dengan 1500 RPM



(A)

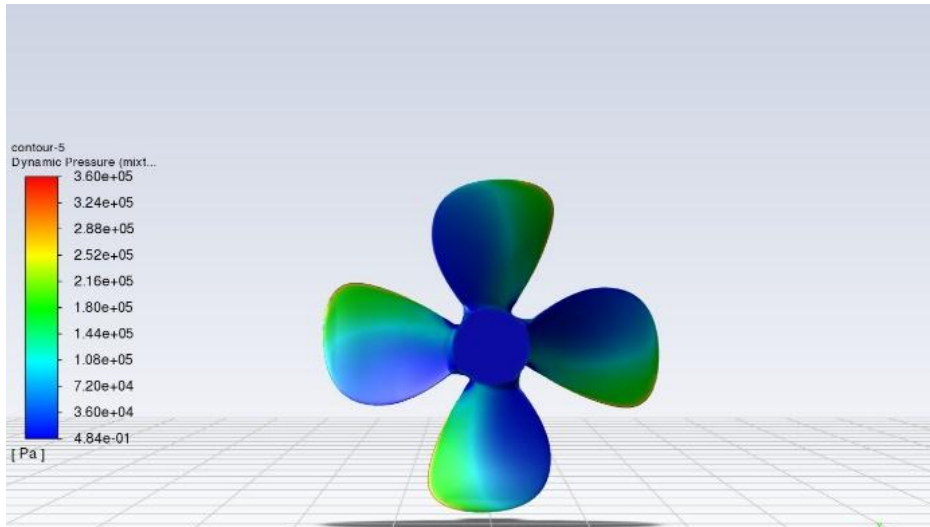


(B)

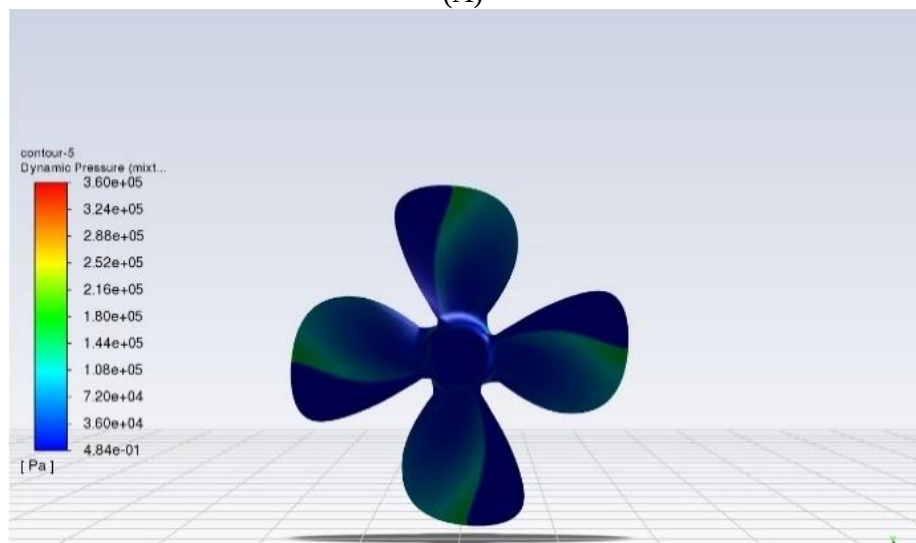
Gambar 4.17 Static Pressure Propeller Wageningen B-Series dengan 1500 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.17 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Wageningen B-Series saat beroperasi pada 1500 RPM. Pada gambar (A), tampak

depan propeller, area tengah bilah ditandai dengan tekanan tinggi (merah), sedangkan ujung bilah memiliki tekanan yang lebih rendah (kuning-oranye), dan area dekat *hub* menunjukkan tekanan rendah (biru). Pada gambar (B), tampak belakang propeller, ujung bilah menunjukkan tekanan sedang (hijau) yang bergradasi menjadi tekanan rendah (biru) di dekat *hub*, menunjukkan akselerasi aliran fluida yang lebih besar dan penurunan tekanan.



(A)

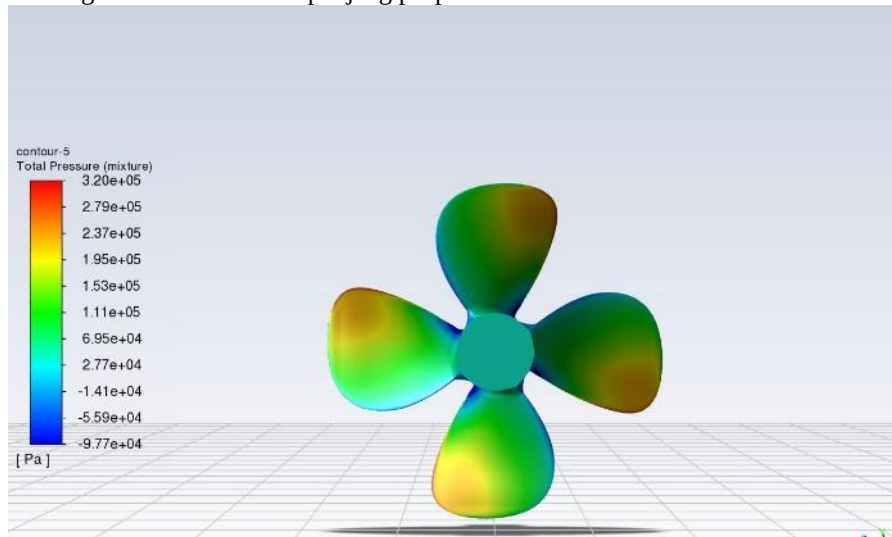


(B)

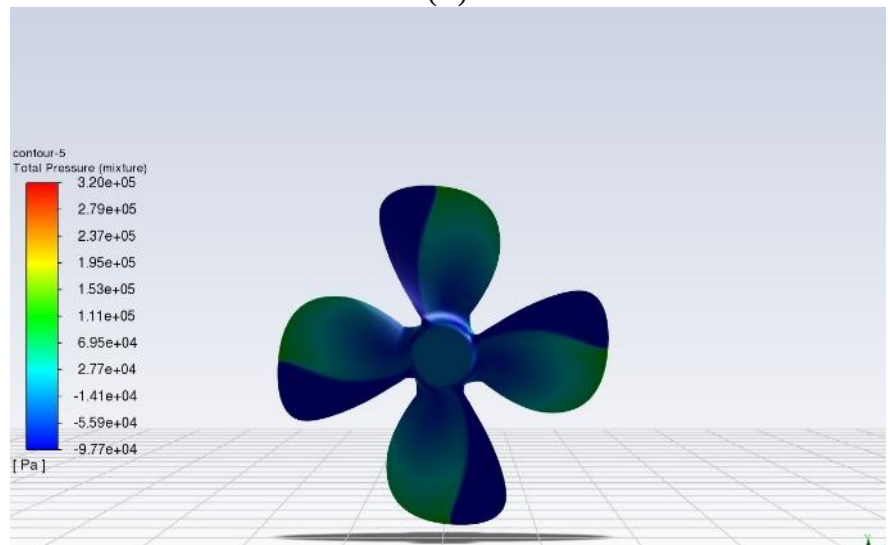
Gambar 4.18 *Dynamic Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 1500 RPM:
(A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.18 menunjukkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 1500 RPM. Pada gambar (A) tampak depan, ujung bilah menunjukkan tekanan dinamis sedang (hijau), yang menurun menjadi

tekanan rendah (biru tua) mendekati *hub*, mencerminkan peningkatan kecepatan fluida. Pada gambar (B) tampak belakang, ujung bilah menunjukkan tekanan dinamis rendah (biru), yang sedikit meningkat ke arah pangkal (hijau dan biru muda), kemudian kembali menurun di sekitar *hub*. Pola ini mencerminkan variasi kecepatan dan energi kinetik fluida di sepanjang propeller.



(A)



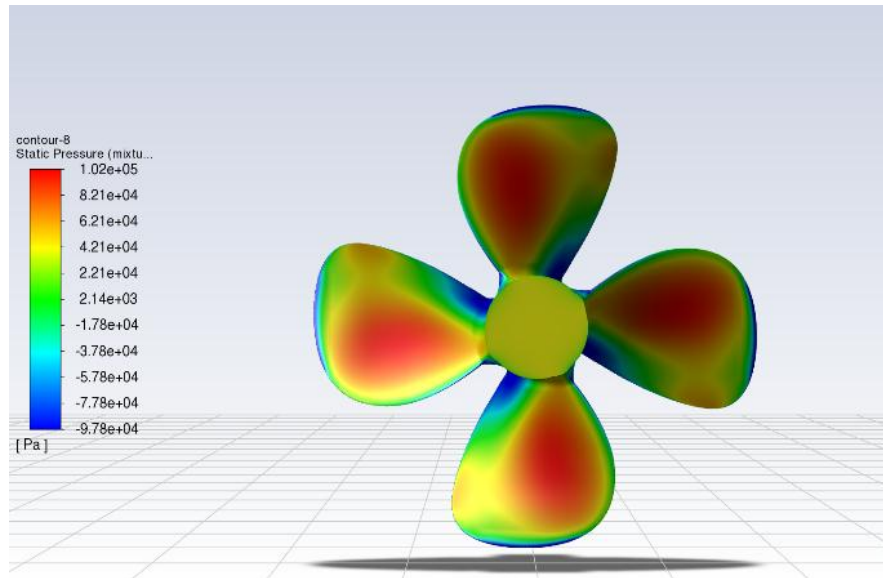
(B)

Gambar 4.19 *Total Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 1500 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

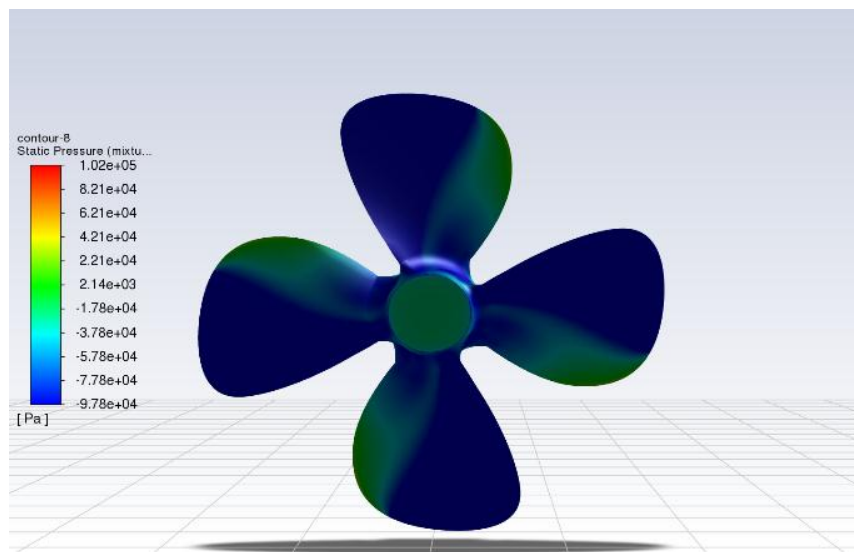
Gambar 4.19 menunjukkan distribusi tekanan total pada Propeller Wageningen B-Series pada 1500 RPM. Pada gambar (A) tampak depan, ujung bilah menunjukkan tekanan total tinggi (oranye), yang menurun menjadi sedang (kuning) dan rendah

(biru) mendekati *hub*, mencerminkan penurunan energi aliran. Pada gambar (B) tampak belakang, ujung bilah memiliki tekanan total sedang (hijau) yang menurun menjadi rendah (biru) mendekati *hub*, menunjukkan penurunan energi aliran yang lebih besar di sisi belakang propeller.

B. *Propeller Wageningen B-Series* dengan 1800 RPM



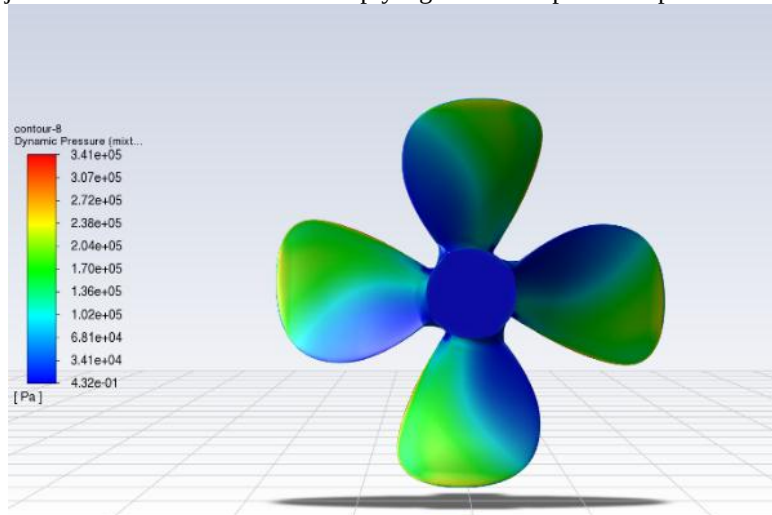
(A)



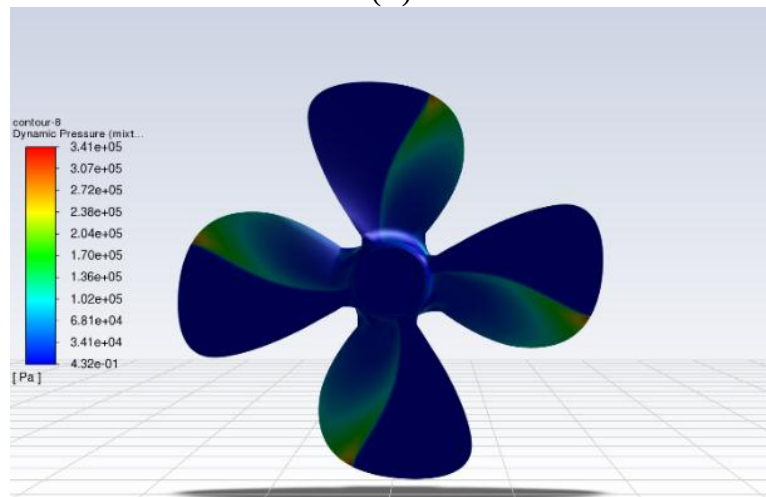
(B)

Gambar 4.20 Static *Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 1800 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.20 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Wageningen B-Series pada 1800 RPM. Pada tampak depan (A), area tengah bilah tetap bertekanan tinggi (merah), sementara ujung bilah menunjukkan tekanan lebih tinggi (kuning-oranye) dibandingkan kecepatan 1500 RPM. Area *hub* tetap bertekanan rendah (biru). Pada tampak belakang (B), ujung bilah bertekanan sedang (hijau), namun penurunan tekanan ke biru muda dan biru tua terjadi lebih cepat, menunjukkan aliran fluida dan efek hisap yang lebih kuat pada kecepatan ini.



(A)

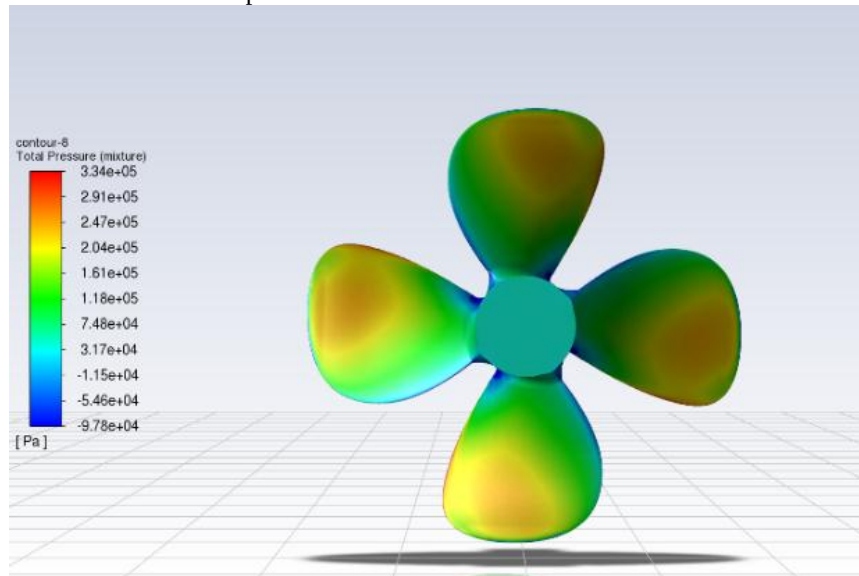


(B)

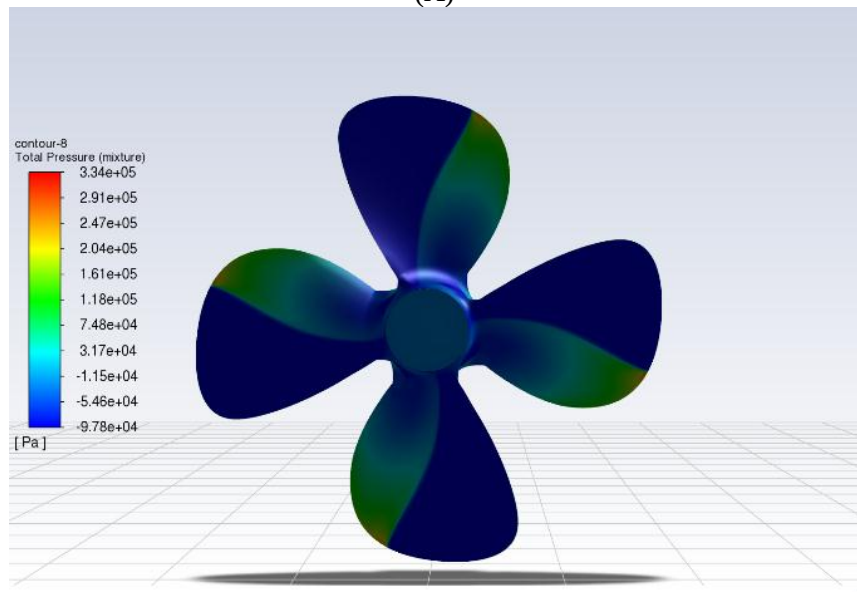
Gambar 4.21 *Dynamic Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 1800 RPM:
(A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.21 dan 4.18 membandingkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Wageningen B-Series pada 1800 RPM dan 1500 RPM. Pada 1800 RPM (Gambar 4.21A), tampak depan menunjukkan tekanan dinamis tinggi (hijau) di ujung bilah, dengan transisi lebih lambat ke biru tua di *hub*, sedangkan pada 1500 RPM

(Gambar 4.18A), area hijau lebih kecil dan warna biru lebih cepat muncul. Tampak belakang (Gambar 4.21B) menunjukkan pola serupa, dengan tekanan dinamis lebih luas di 1800 RPM dibandingkan 1500 RPM (Gambar 4.18B), di mana tekanan lebih rendah dan turun lebih cepat.



(A)



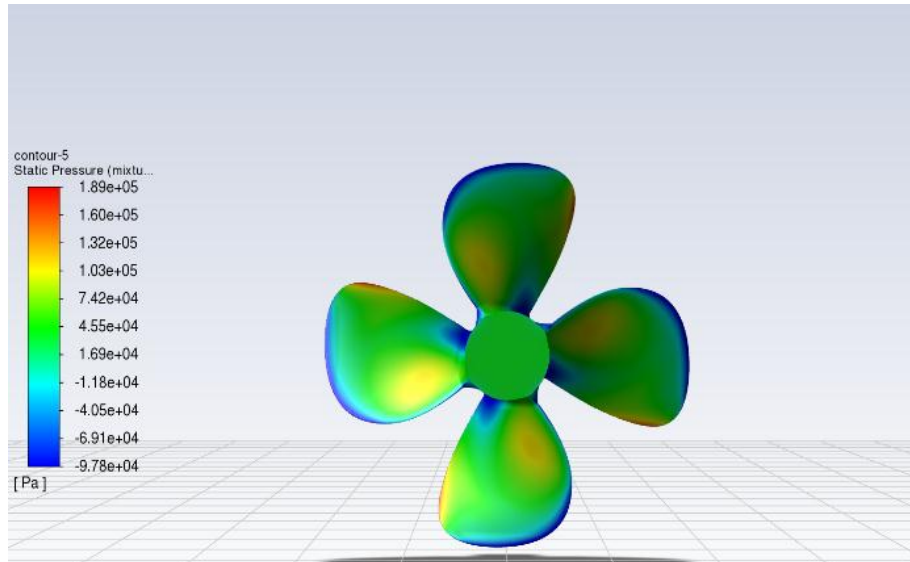
(B)

Gambar 4.22 *Total Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 1800 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

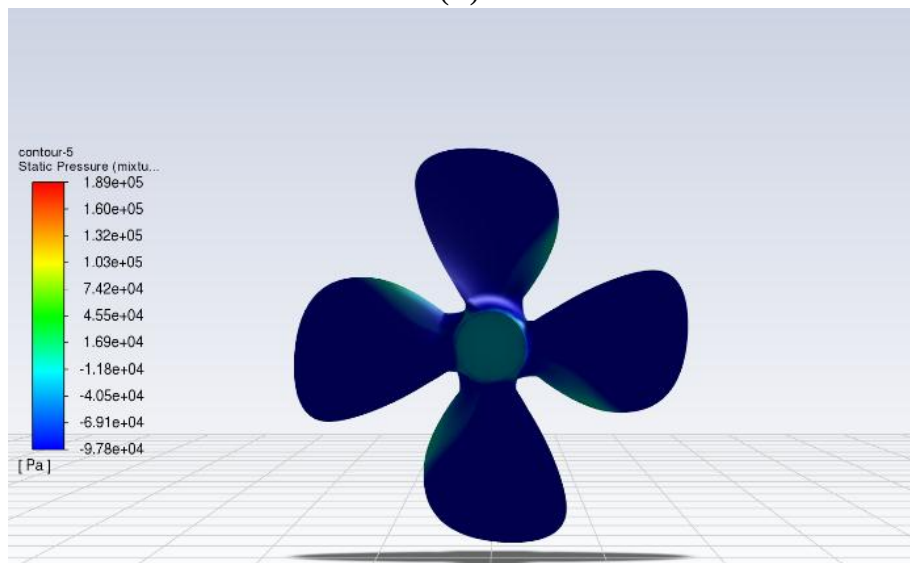
Gambar 4.22 dan 4.19 membandingkan distribusi tekanan total pada Propeller Wageningen B-Series pada 1800 RPM dan 1500 RPM. Pada 1800 RPM (Gambar

4.22A), tampak depan menunjukkan area tekanan total tinggi (oranye) lebih luas di ujung bilah dibandingkan dengan 1500 RPM (Gambar 4.19A), di mana tekanan lebih merata dan lebih rendah. Pada tampak belakang 1800 RPM (Gambar 4.22B), tekanan total tinggi (hijau) lebih dominan, sementara pada 1500 RPM (Gambar 4.19B), penurunan tekanan lebih cepat terjadi, dengan area biru tua lebih luas di dekat *hub*.

C. Propeller Wageningen B-Series dengan 2400 RPM



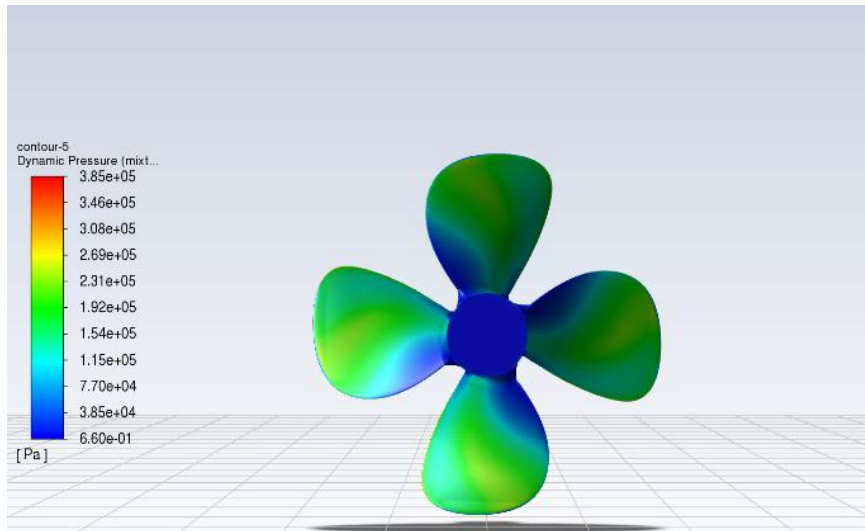
(A)



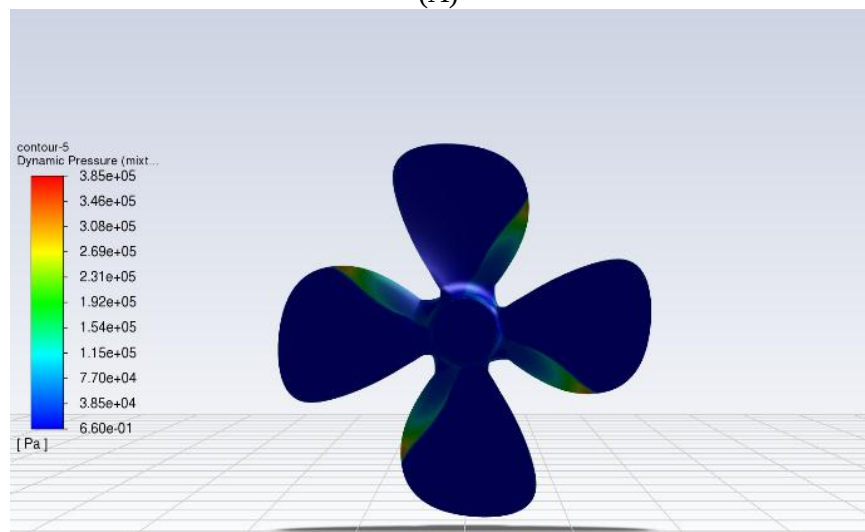
(B)

Gambar 4.23 Static Pressure Propeller Wageningen B-Series dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.23 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Wageningen B-Series pada 2400 RPM. Pada tampak depan (A), ujung bilah berwarna biru tua, menandakan tekanan rendah, dengan sebagian besar bilah berwarna hijau (tekanan moderat) dan sedikit biru tua di dekat boss. Pada tampak belakang (B), warna biru tua mendominasi, menunjukkan tekanan rendah secara keseluruhan. Dibandingkan dengan 1800 RPM (Gambar 4.20), tekanan di ujung bilah pada 2400 RPM lebih rendah, dengan tampilan belakang juga menunjukkan penurunan tekanan yang lebih signifikan di seluruh area bilah.



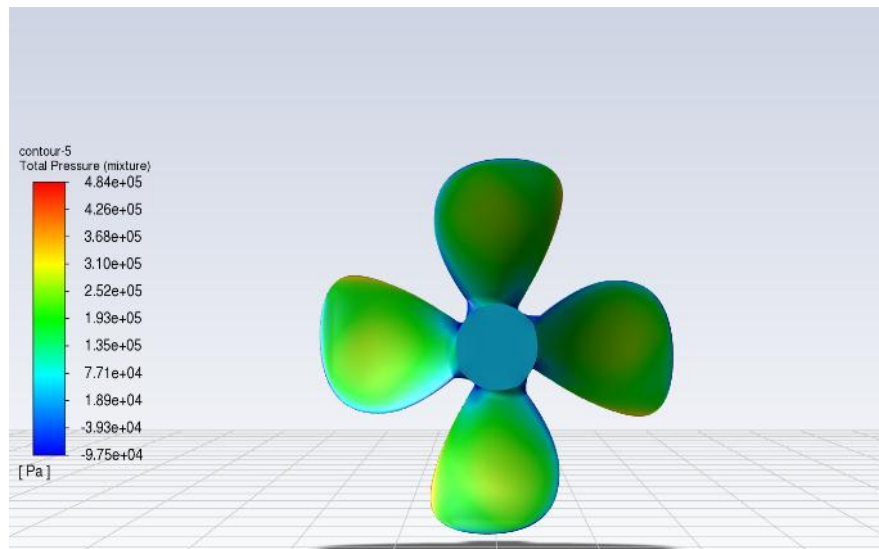
(A)



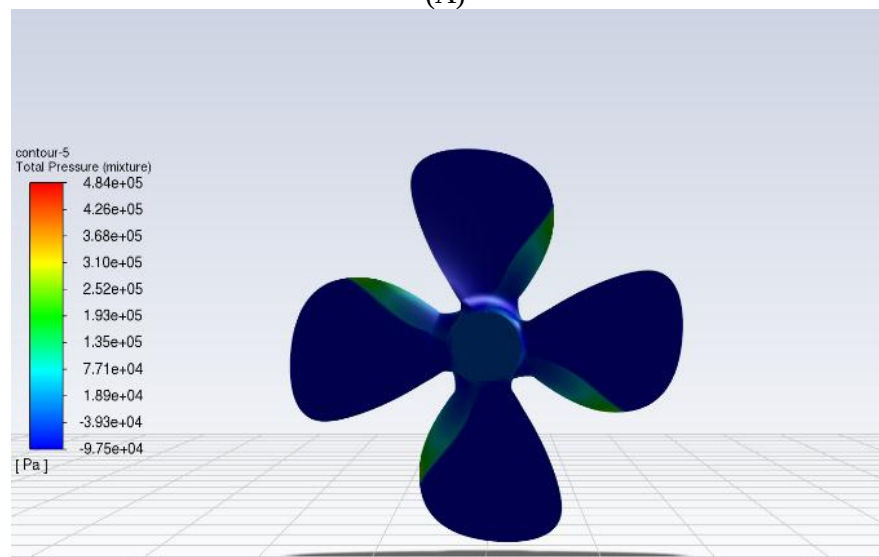
(B)

Gambar 4.24 *Dynamic Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.24 menunjukkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Wageningen B-Series pada 2400 RPM. Pada tampak depan (A), ujung bilah berwarna biru muda (tekanan rendah), yang berubah menjadi hijau, lalu kembali ke biru tua di dekat boss. Pada tampak belakang (B), dominasi warna biru tua menunjukkan tekanan dinamis rendah, dengan sedikit warna hijau dan biru muda di sekitar boss. Dibandingkan dengan 1800 RPM (Gambar 4.21), pada 2400 RPM distribusi tekanan lebih bervariasi di tampak depan, sedangkan tampak belakang menunjukkan tekanan lebih rendah dan pola lebih sederhana.



(A)

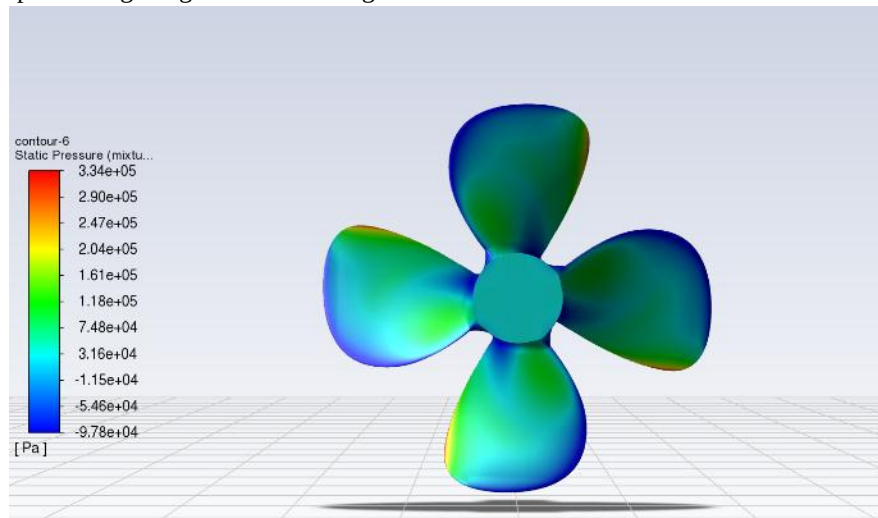


(B)

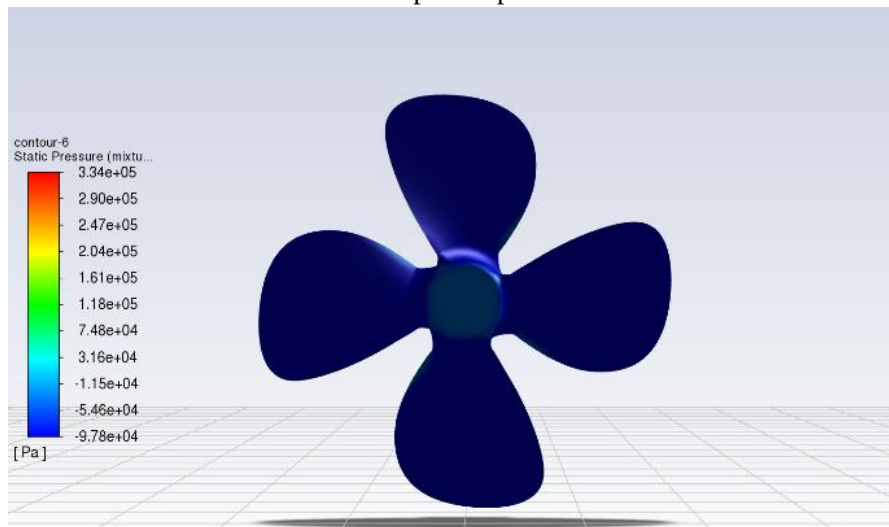
Gambar 4.25 *Total Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.25 menunjukkan distribusi tekanan total pada Propeller Wageningen B-Series pada 2400 RPM. Pada tampak depan (A), bilah propeller didominasi warna hijau dan kuning, menunjukkan tekanan total sedang, dengan warna biru tua di sekitar boss yang menandakan tekanan lebih rendah. Pada tampak belakang (B), warna biru tua mendominasi, menunjukkan tekanan rendah di sebagian besar bilah, dengan sedikit variasi hijau dan biru muda di dekat boss. Dibandingkan 1800 RPM (Gambar 4.22), distribusi tekanan pada 2400 RPM lebih stabil di tampak depan dan lebih rendah di tampak belakang.

D. Propeller Wageningen B-Series dengan 3000 RPM



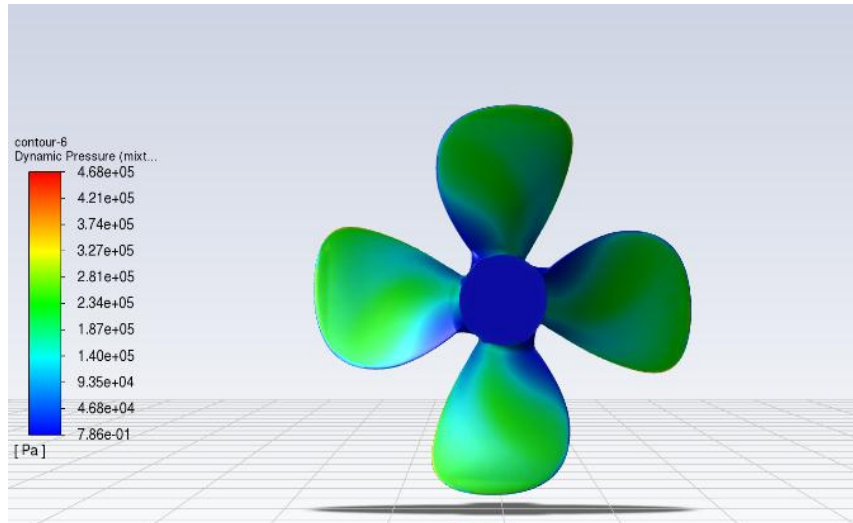
Tampak Depan



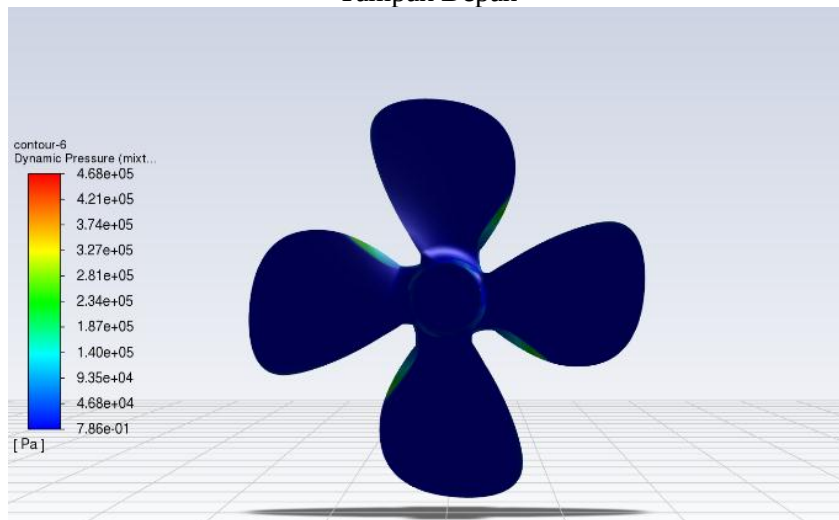
Tampak Belakang

Gambar 4.26 Static Pressure Propeller Wageningen B-Series dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan Propeller; (B) Tampak Belakang Propeller

Gambar 4.26 menunjukkan distribusi *Static Pressure* pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 3000 RPM. Pada tampak depan (A), ujung bilah didominasi warna biru tua, dengan gradasi biru muda dan hijau di tengah bilah, serta biru tua di dekat boss. Tampak belakang (B) didominasi oleh warna biru tua. Dibandingkan Gambar 4.23 pada 2400 RPM, distribusi tekanan pada 3000 RPM menunjukkan lebih banyak gradasi biru muda dan hijau di tengah bilah, sementara bagian belakang tetap didominasi biru tua, namun lebih intens pada 3000 RPM.



Tampak Depan

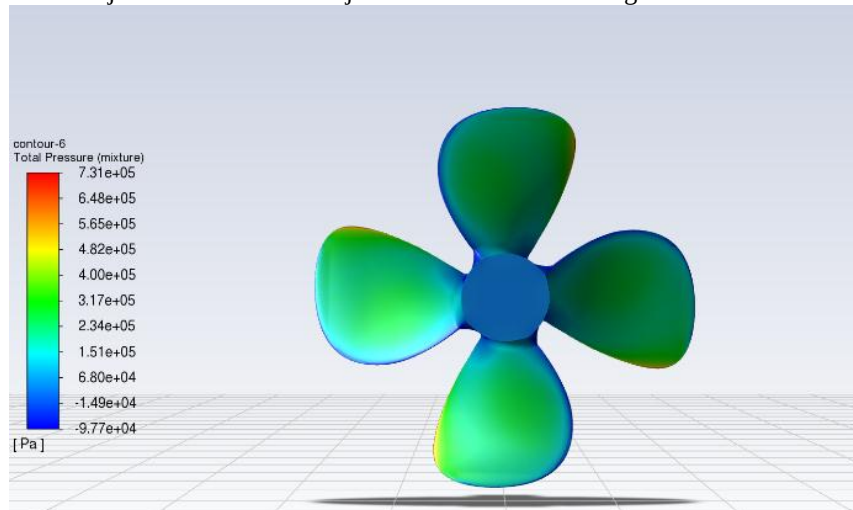


Tampak Belakang

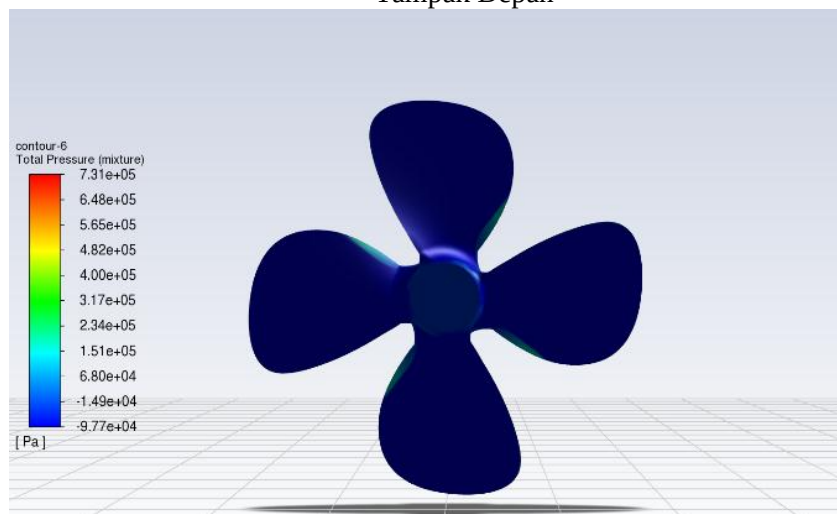
Gambar 4.27 *Dynamic Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.27 menunjukkan distribusi *Dynamic Pressure* pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 3000 RPM. Pada tampak depan (A), ujung bilah didominasi warna hijau, dengan gradasi biru muda dan hijau di tengah, serta

biru tua di dekat *boss*. Tampak belakang (B) didominasi oleh biru tua, dengan sedikit hijau di dekat *boss*. Dibandingkan dengan Gambar 4.24 pada 2400 RPM, distribusi pada 3000 RPM menunjukkan warna hijau lebih terkonsentrasi di ujung bilah, sementara biru muda dan hijau lebih menyebar di tengah. Bagian belakang pada 3000 RPM menunjukkan lebih sedikit hijau di dekat *boss* dibanding 2400 RPM.



Tampak Depan



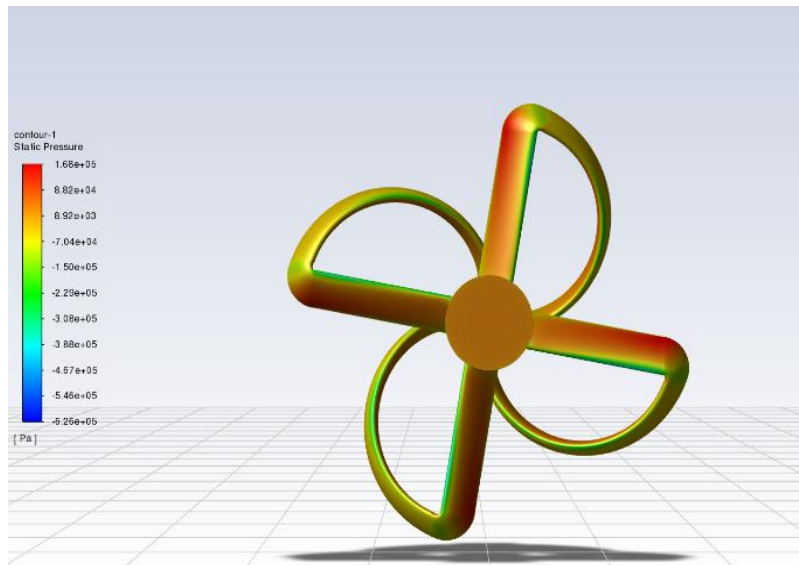
Tampak Belakang

Gambar 4.28 *Total Pressure* Propeller Wageningen B-Series dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

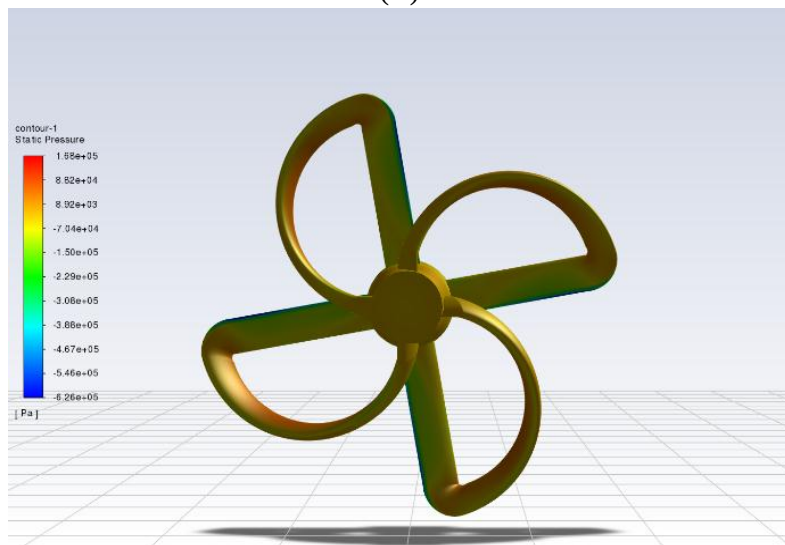
Gambar 4.28 menunjukkan distribusi *Total Pressure* pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 3000 RPM. Pada tampak depan (A), ujung bilah didominasi warna hijau, dengan gradasi biru muda dan hijau di tengah, serta biru tua di sisi bilah dan dekat *boss* propeller. Tampak belakang (B) didominasi oleh biru tua, menunjukkan tekanan rendah yang merata. Dibandingkan dengan Gambar 4.25 pada 2400 RPM, distribusi tekanan pada 3000 RPM menunjukkan lebih banyak

area biru tua, terutama di sisi bilah dan dekat boss, menandakan tekanan total yang lebih rendah pada kecepatan yang lebih tinggi.

E. Propeller Toroidal dengan 1500 RPM



(A)

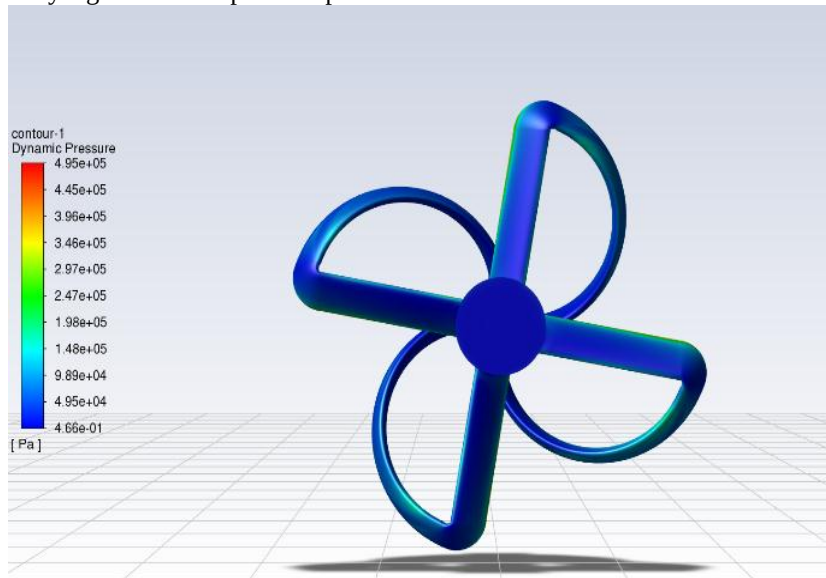


(B)

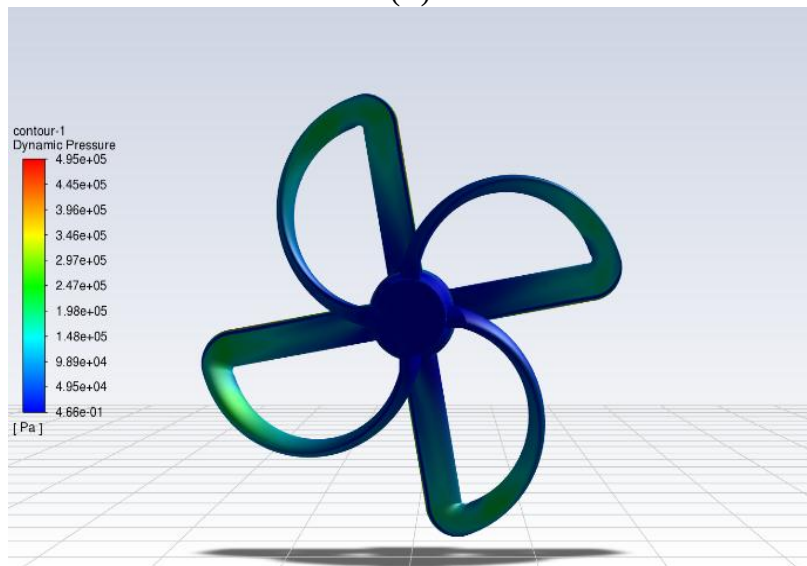
Gambar 4.29 Static Pressure Propeller Toroidal dengan 1500 RPM: (A) Tampak Depan Propeller; (B) Tampak Belakang Propeller

Gambar 4.29 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Toroidal pada 1500 RPM. Tampak depan (A) didominasi oleh warna hijau dengan sedikit area oranye di ujung bilah, menunjukkan tekanan statis yang lebih rendah dibandingkan

Propeller Wageningen B-Series, yang memiliki area merah di tengah bilahnya (Gambar 4.17). Tampak belakang (B) Propeller Toroidal juga didominasi oleh warna hijau, berbeda dengan Propeller Wageningen B-Series yang menunjukkan penurunan tekanan lebih signifikan dari ujung bilah ke dekat boss. Ini menunjukkan distribusi tekanan yang lebih stabil pada Propeller Toroidal.



(A)

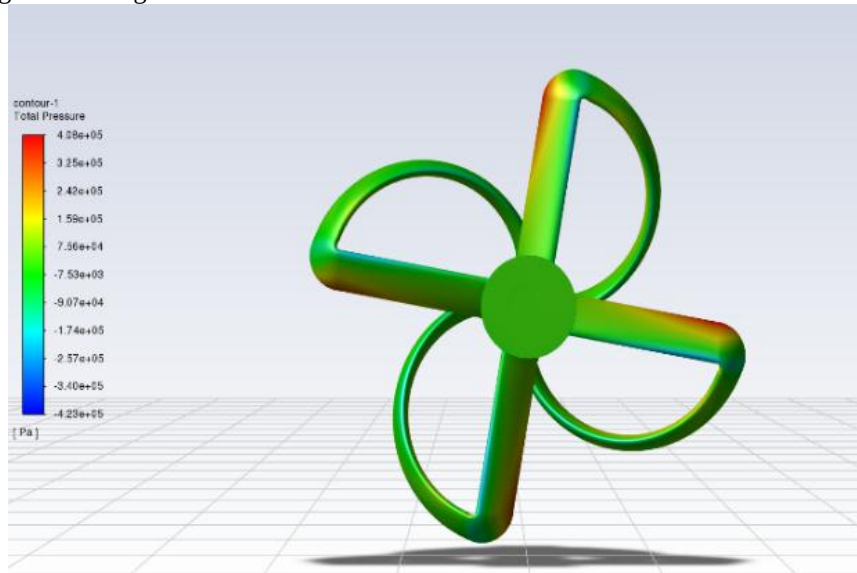


(B)

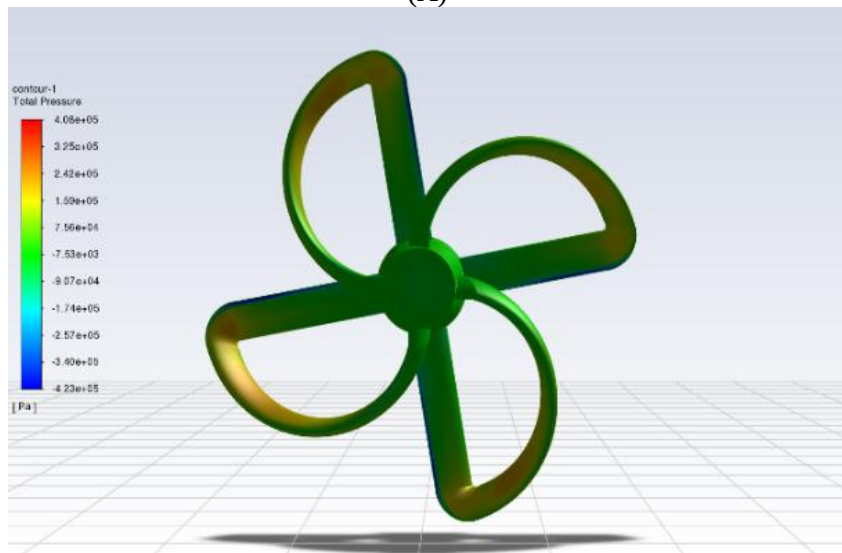
Gambar 4.30 *Dynamic Pressure* Propeller Toroidal dengan 1500 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.30 menunjukkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Toroidal pada 1500 RPM. Tampak depan (A) didominasi oleh warna biru tua dengan sedikit

hijau di ujung bilah, menandakan tekanan dinamis rendah. Sebagai perbandingan, Propeller Wageningen B-Series (Gambar 4.18A) memiliki ujung bilah berwarna hijau, menandakan tekanan dinamis yang lebih tinggi. Tampak belakang (B) Propeller Toroidal juga didominasi oleh biru tua, dengan sedikit hijau di ujung bilah, menunjukkan tekanan dinamis rendah dan sedikit peningkatan di ujung. Sebaliknya, Propeller Wageningen B-Series menunjukkan variasi tekanan yang lebih besar di bagian belakang.



(A)

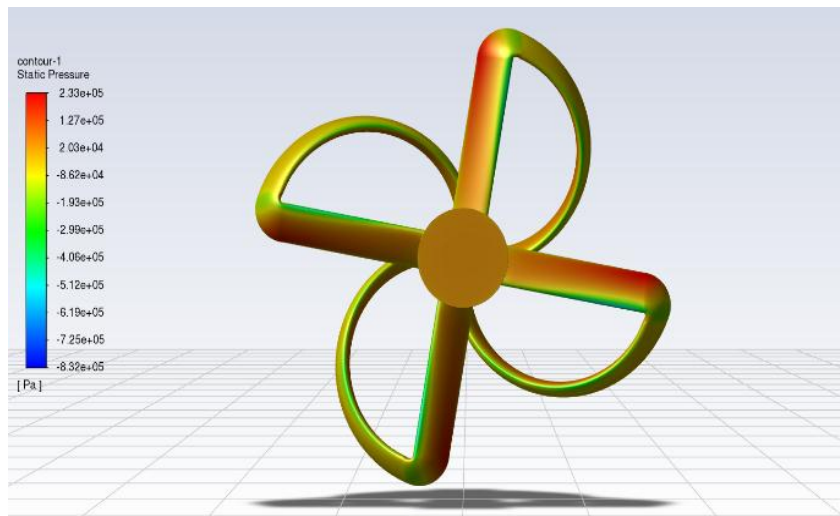


(B)

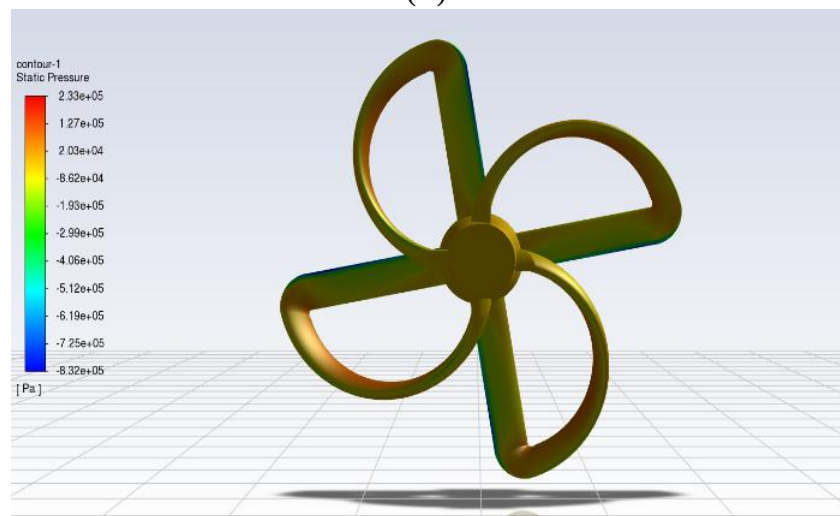
Gambar 4.31 *Total Pressure* Propeller Toroidal dengan 1500 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.31 menunjukkan distribusi tekanan total pada Propeller Toroidal pada 1500 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan area merah di ujung bilah, menandakan tekanan tinggi, dengan sebagian besar bilah berwarna hijau dan biru tua di dekat boss, menunjukkan tekanan sedang hingga rendah. Sebagai perbandingan, Propeller Wageningen B-Series (Gambar 4.19A) memiliki distribusi tekanan yang lebih bervariasi dengan area tekanan tinggi lebih luas. Tampak belakang (B) Propeller Toroidal didominasi warna hijau, menunjukkan tekanan sedang, sementara pada Propeller Wageningen B-Series, variasi tekanan lebih terlihat dengan kombinasi warna hijau, biru muda, dan biru tua.

F. Propeller Toroidal dengan 1800 RPM



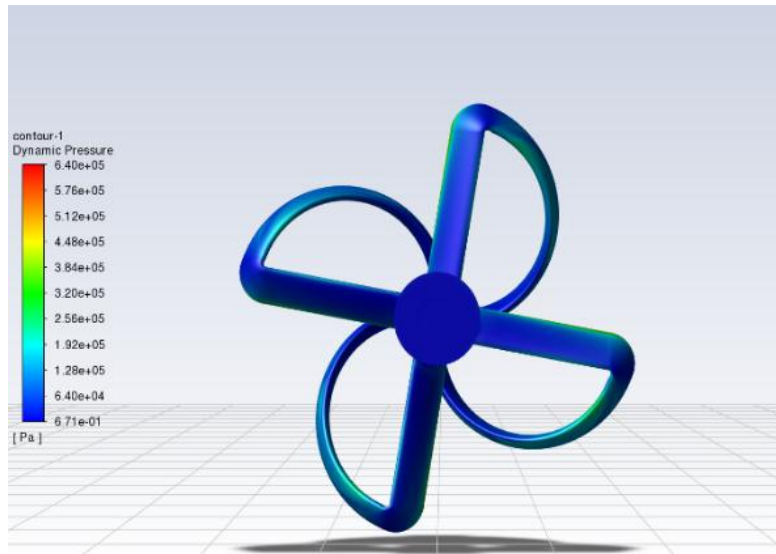
(A)



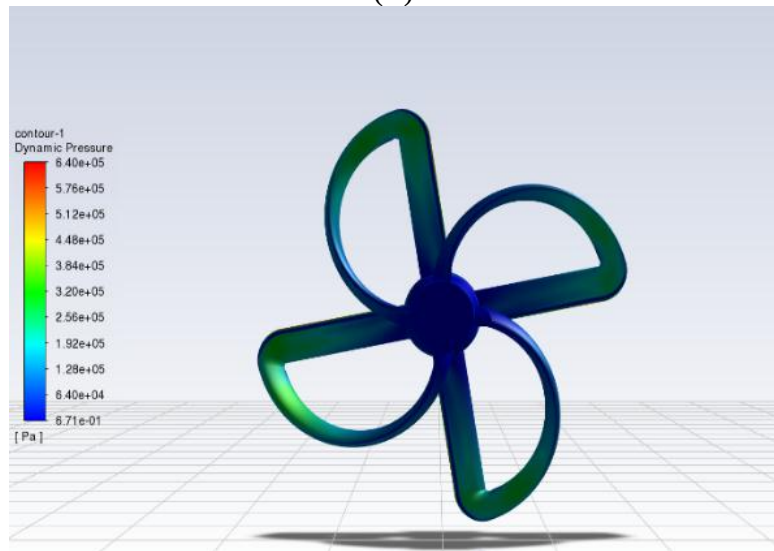
(B)

Gambar 4.32 Static Pressure Propeller Toroidal dengan 1800 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.32 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Toroidal pada 1800 RPM. Tampak depan (A) didominasi warna merah dari ujung bilah hingga boss, menunjukkan tekanan statis tinggi, sementara sisi lain bilah berwarna hijau, menandakan tekanan lebih rendah. Tampak belakang (B) didominasi warna hijau, menunjukkan tekanan seragam dan sedang. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series pada 1800 RPM (Gambar 4.20), tekanan tertinggi terdapat di tengah bilah dengan warna merah, sementara ujungnya berwarna kuning dan biru di dekat boss. Pada 1500 RPM (Gambar 4.29), tekanan statis lebih rendah dengan dominasi warna hijau dan sedikit oranye di pinggiran.



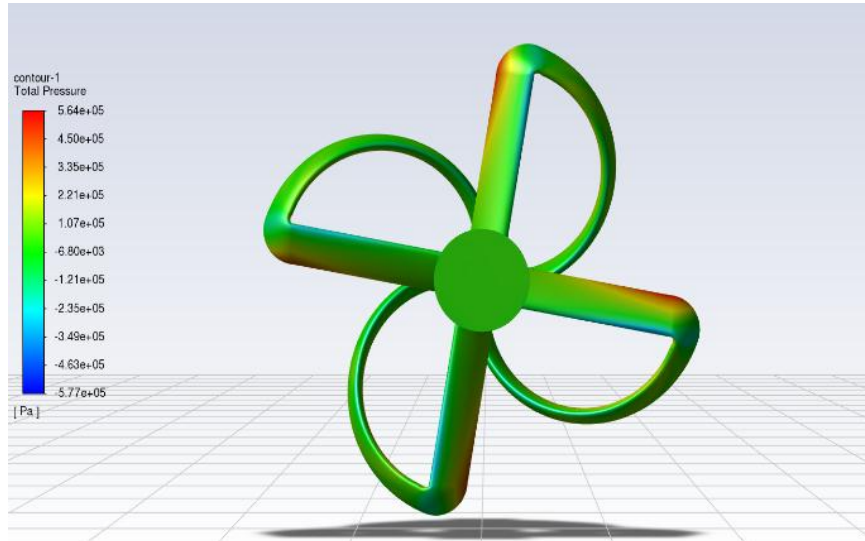
(A)



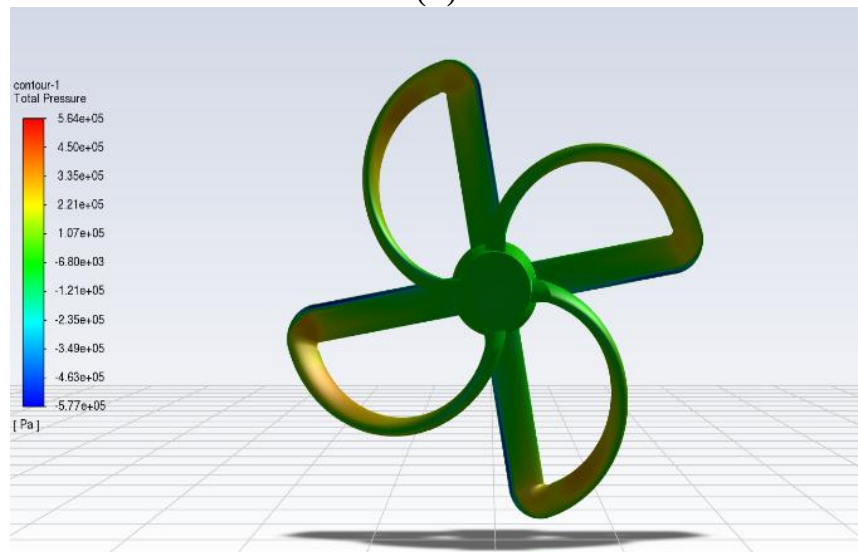
(B)

Gambar 4.33 *Dynamic Pressure* Propeller Toroidal dengan 1800 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.33 menunjukkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Toroidal di 1800 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan sedikit warna hijau di ujung bilah, menandakan tekanan dinamis lebih tinggi di area tersebut. Tampak belakang (B) memperlihatkan gradasi dari hijau ke biru, menunjukkan penurunan tekanan dinamis dari ujung bilah ke boss. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series di 1800 RPM (Gambar 4.21), tekanan dinamis pada propeller Wageningen lebih tinggi dan merata di seluruh bilah. Pada 1500 RPM (Gambar 4.30), Propeller Toroidal didominasi warna biru tua, menunjukkan tekanan dinamis lebih rendah dibandingkan 1800 RPM.



(A)

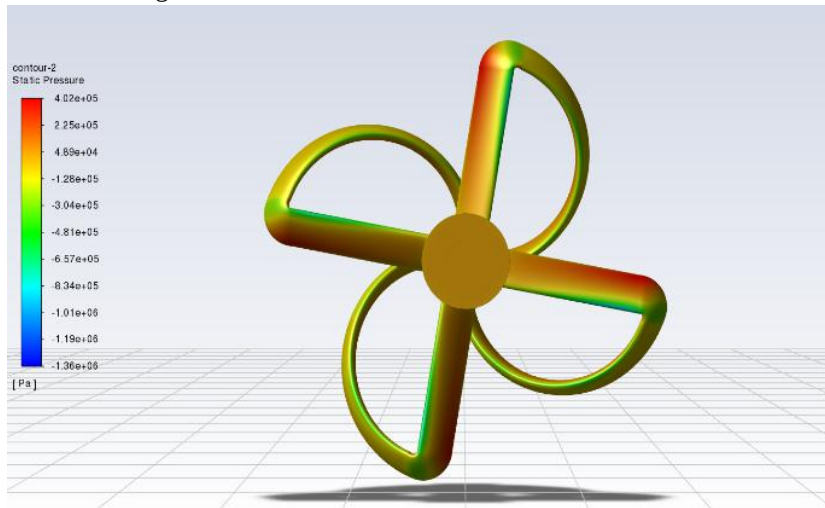


(B)

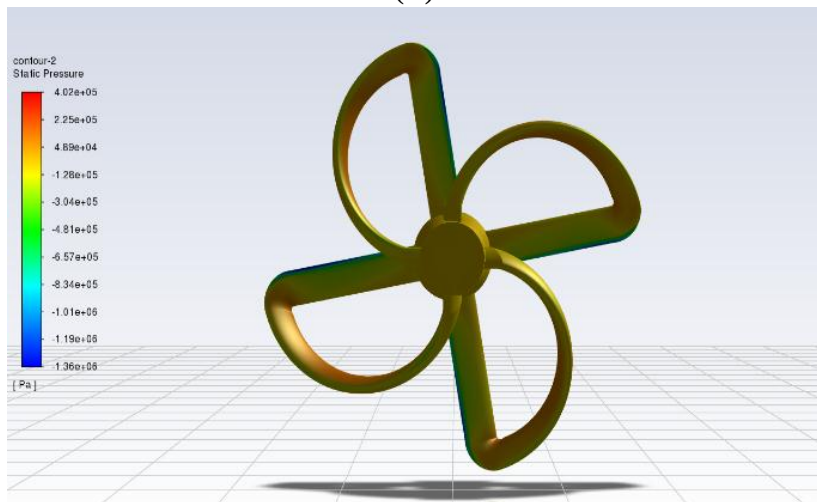
Gambar 4.34 *Total Pressure* Propeller Toroidal dengan 1800 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.34 menunjukkan distribusi tekanan total pada Propeller Toroidal di 1800 RPM. Pada tampak depan (A), terdapat sedikit warna merah di ujung bilah, menandakan tekanan total tinggi, sementara sebagian besar bilah didominasi oleh warna hijau, menunjukkan tekanan moderat. Tampak belakang (B) didominasi warna hijau dengan sedikit biru tua di dekat *boss*, menandakan tekanan lebih rendah. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series di 1800 RPM (Gambar 4.22), propeller Wageningen menunjukkan lebih banyak variasi tekanan dengan area tekanan tinggi di ujung bilah dan tekanan rendah dekat *boss*. Pada kecepatan 1500 RPM (Gambar 4.31), Propeller Toroidal memiliki distribusi tekanan yang lebih merata dan lebih rendah dibandingkan pada 1800 RPM

G. Propeller Toroidal dengan 2400 RPM



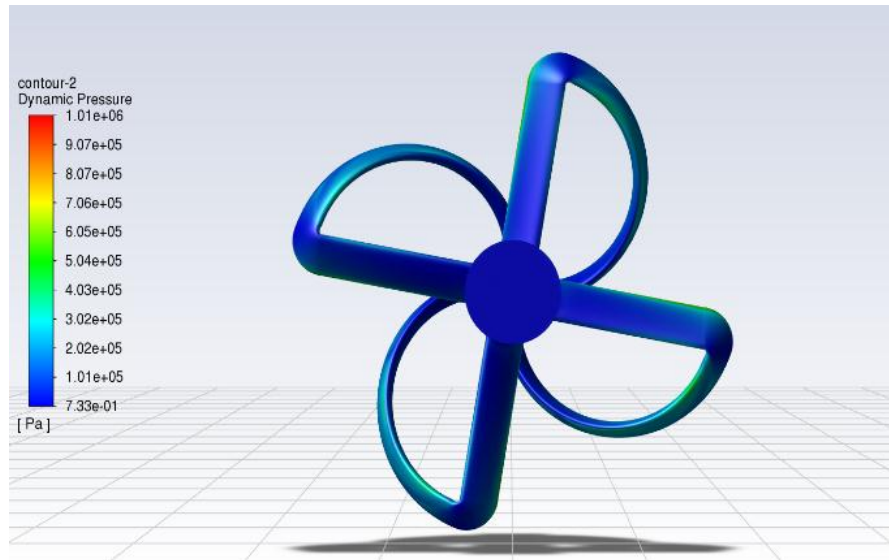
(A)



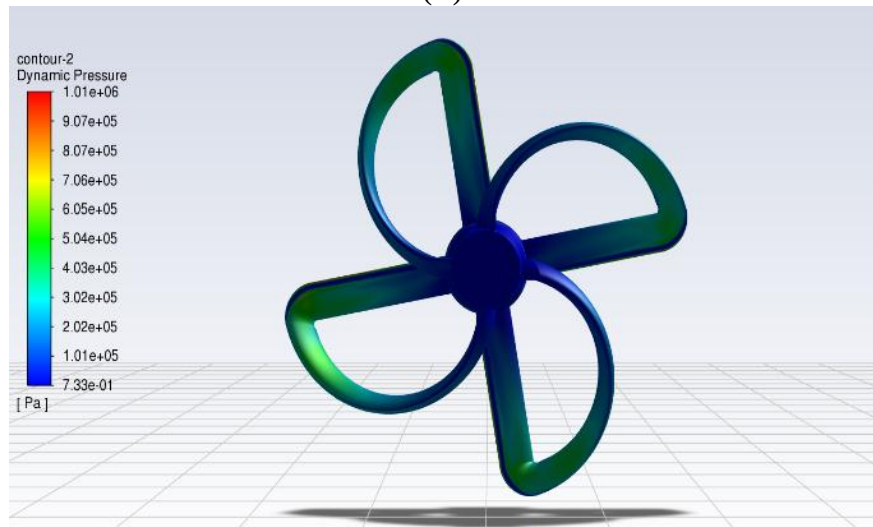
(B)

Gambar 4.35 Static Pressure Propeller Toroidal dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.35 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Toroidal di 2400 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan tekanan tinggi di ujung bilah yang ditandai dengan warna merah, sedangkan sisa bilah didominasi oleh warna hijau yang menunjukkan tekanan stabil. Tampak belakang (B) didominasi warna hijau dengan sedikit biru, menunjukkan tekanan rendah di bagian belakang. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series di 2400 RPM (Gambar 4.23), propeller Wageningen memiliki tekanan lebih rendah di ujung bilah. Pada kecepatan 1800 RPM (Gambar 4.32), Propeller Toroidal memiliki tekanan lebih rendah dengan dominasi warna hijau, sedangkan pada 2400 RPM, tekanan meningkat terutama di ujung bilah.



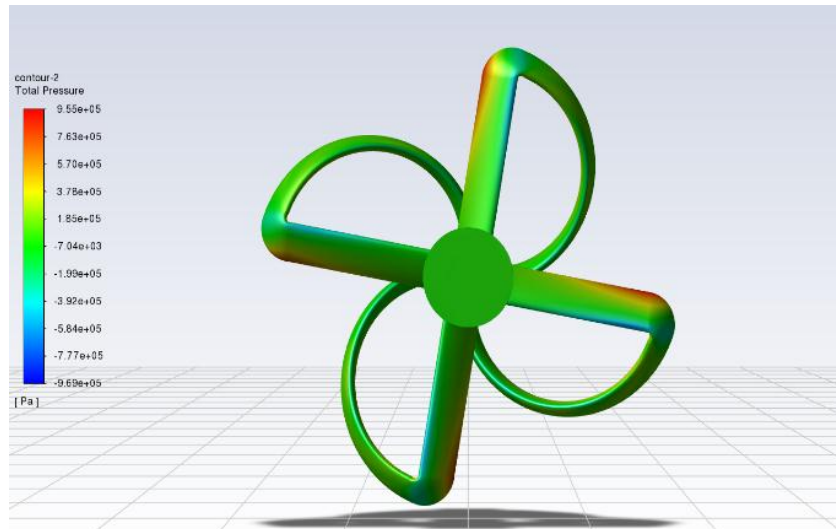
(A)



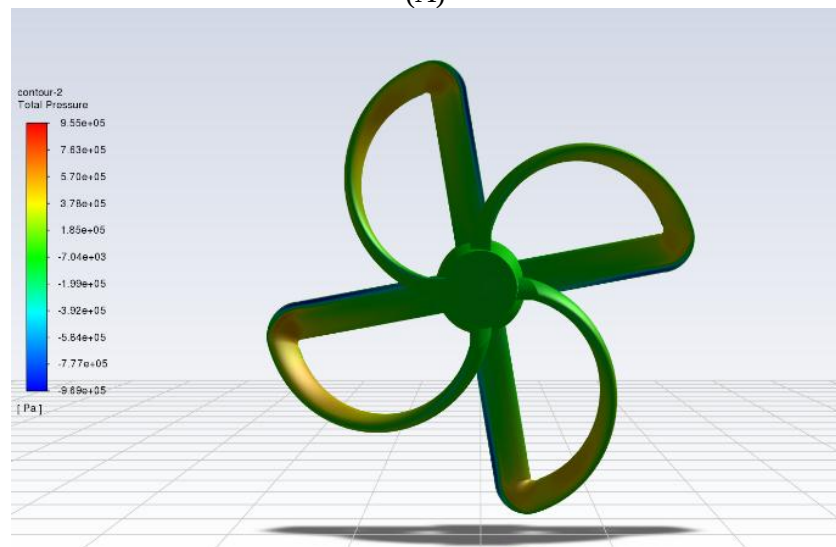
(B)

Gambar 4.36 *Dynamic Pressure* Propeller Toroidal dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.36 menunjukkan tekanan dinamis pada Propeller Toroidal di 2400 RPM. Tampak depan (A) didominasi warna biru tua dengan sedikit hijau di ujung bilah, menandakan tekanan rendah dengan peningkatan sedikit di ujung. Tampak belakang (B) menunjukkan gradasi dari hijau di ujung bilah hingga biru tua di dekat boss, menunjukkan penurunan tekanan dinamis bertahap. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series di 2400 RPM (Gambar 4.24), propeller Wageningen memiliki variasi tekanan lebih besar dengan lebih banyak area biru muda dan hijau. Pada 1800 RPM (Gambar 4.33), tekanan dinamis pada Propeller Toroidal lebih rendah, dengan warna hijau yang kurang menonjol



(A)

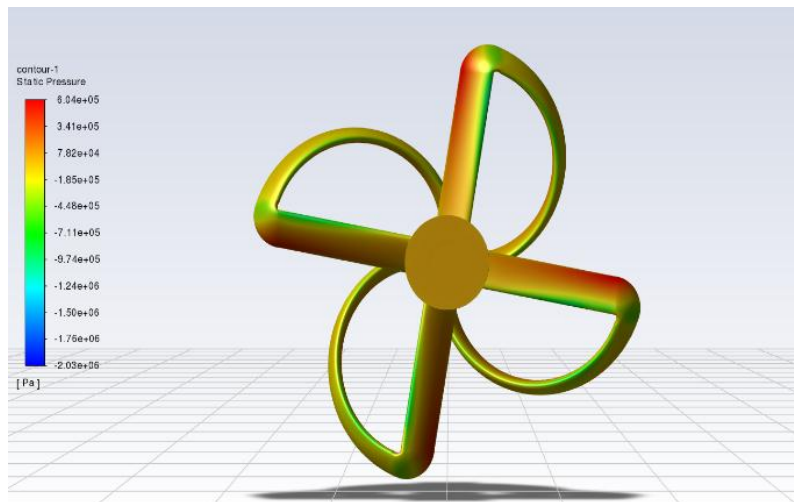


(B)

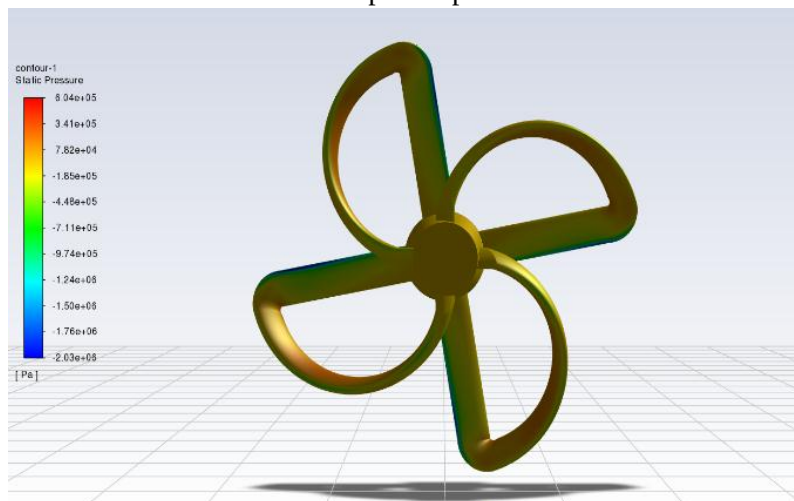
Gambar 4.37 *Total Pressure* Propeller Toroidal dengan 2400 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.37 menunjukkan distribusi tekanan total pada Propeller Toroidal di 2400 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan warna merah di ujung bilah, menandakan tekanan total tinggi, sementara warna hijau mendominasi bagian lainnya, mengindikasikan tekanan lebih rendah. Tampak belakang (B) didominasi warna hijau dengan sedikit biru tua dari ujung bilah hingga boss, menandakan tekanan total rendah. Dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series (Gambar 4.25), tekanan lebih merata dengan dominasi hijau dan kuning di depan, dan biru tua di belakang. Pada kecepatan 1800 RPM (Gambar 4.34), tekanan total pada Propeller Toroidal lebih rendah dengan warna merah lebih sedikit di ujung bilah.

H. Propeller Toroidal dengan 3000 RPM



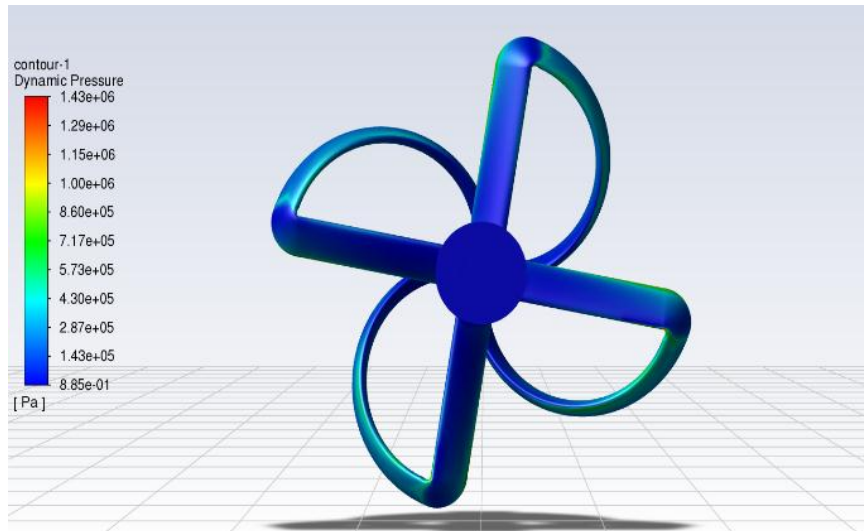
Tampak Depan



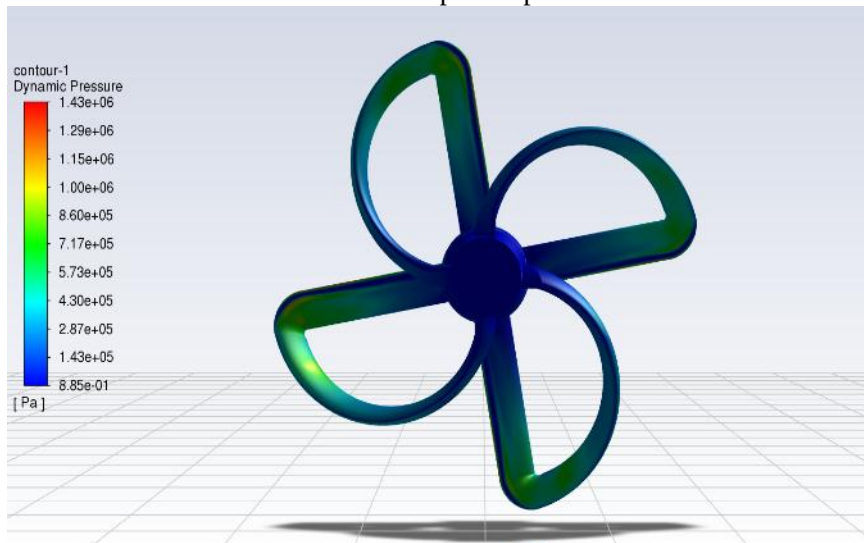
Tampak Belakang

Gambar 4.38 *Static Pressure* Propeller Toroidal dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan Propeller; (B) Tampak Belakang Propeller

Gambar 4.38 menunjukkan distribusi tekanan statis pada Propeller Toroidal di 3000 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan tekanan tinggi di ujung bilah dengan warna merah, sementara area lainnya didominasi oleh warna hijau. Tampak belakang (B) menunjukkan penurunan tekanan dengan dominasi warna hijau dan sedikit biru di ujung bilah. Dibandingkan dengan kecepatan 2400 RPM (Gambar 4.35), tekanan di ujung bilah lebih tinggi pada 3000 RPM. Pada Propeller Wageningen B-Series di 3000 RPM (Gambar 4.26), dominasi warna biru tua menunjukkan tekanan statis yang lebih rendah di ujung bilah, mengindikasikan perbedaan karakteristik aerodinamis antara kedua propeller



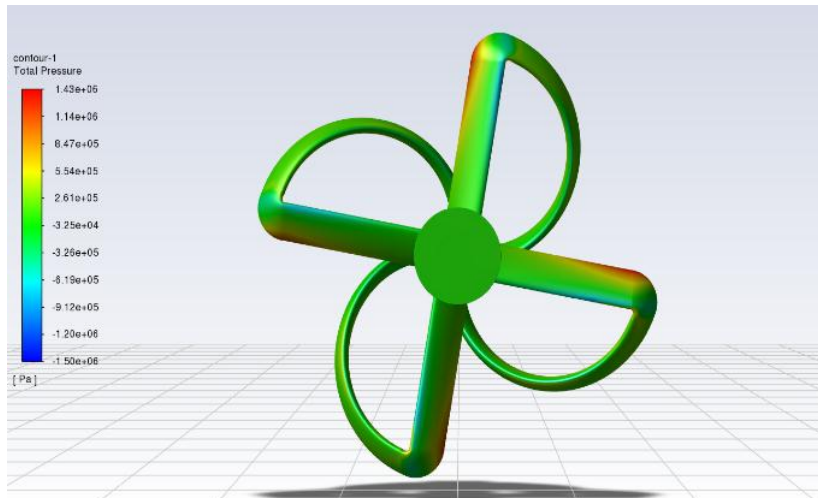
Tampak Depan



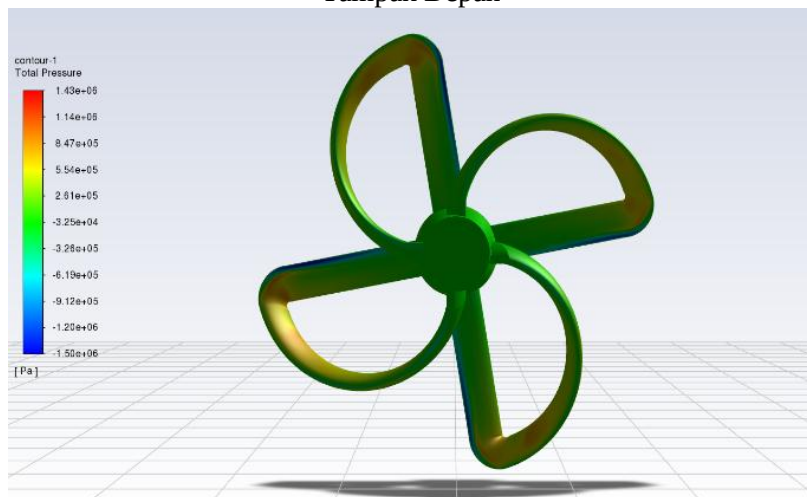
Tampak Belakang

Gambar 4.39 *Dynamic Pressure* Propeller Toroidal dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

Gambar 4.39 menunjukkan distribusi tekanan dinamis pada Propeller Toroidal di 3000 RPM. Tampak depan (A) didominasi oleh warna biru tua, dengan sedikit warna hijau di ujung bilah yang menandakan tekanan dinamis lebih tinggi. Tampak belakang (B) menunjukkan gradasi dari hijau di ujung bilah ke biru tua mendekati boss, menandakan penurunan tekanan dinamis. Dibandingkan dengan 2400 RPM (Gambar 4.36), tekanan dinamis di 3000 RPM lebih rendah di sebagian besar area. Sementara itu, Propeller Wageningen B-Series di 3000 RPM (Gambar 4.27) memiliki distribusi tekanan dinamis yang lebih merata, dengan tekanan lebih tinggi dibandingkan Propeller Toroidal, menunjukkan perbedaan efisiensi dan performa di antara keduanya.



Tampak Depan



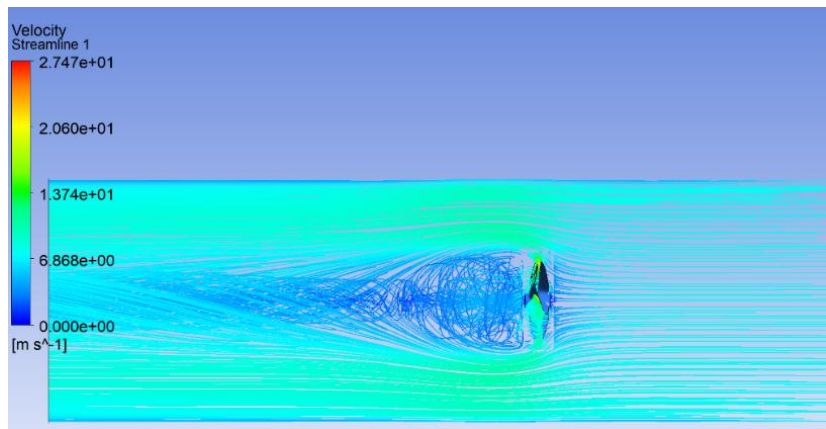
Tampak Belakang

Gambar 4.40 *Total Pressure* Propeller Toroidal dengan 3000 RPM: (A) Tampak Depan *Propeller*; (B) Tampak Belakang *Propeller*

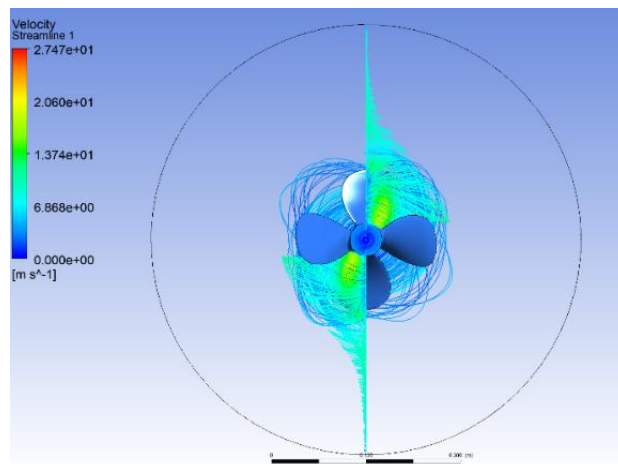
Gambar 4.40 menunjukkan distribusi tekanan total pada propeller Toroidal dengan kecepatan 3000 RPM. Tampak depan (A) menunjukkan kontur merah di ujung bilah yang menandakan tekanan tinggi, dengan kontur biru muda menuju boss propeller dan dominasi warna hijau. Di tampak belakang (B), kontur biru tua memanjang hingga boss, juga didominasi hijau, menunjukkan perbedaan tekanan signifikan antara ujung bilah dan boss. Jika dibandingkan dengan Gambar 4.37 (2400 RPM), area tekanan tinggi lebih terbatas pada kecepatan rendah. Sementara Gambar 4.28 (Wageningen B-Series, 3000 RPM) menunjukkan distribusi tekanan yang lebih merata, dengan warna hijau dan biru muda, berbeda dari propeller Toroidal yang didominasi warna hijau. Perbedaan ini dapat memengaruhi performa kedua propeller dalam kondisi yang sama.

4.4.3 Hasil *Streamline* Antara Propeller Wageningen B-Series dan Propeller Toroidal

A. Result *Streamline* Propeller Wageningen B-Series



(A)

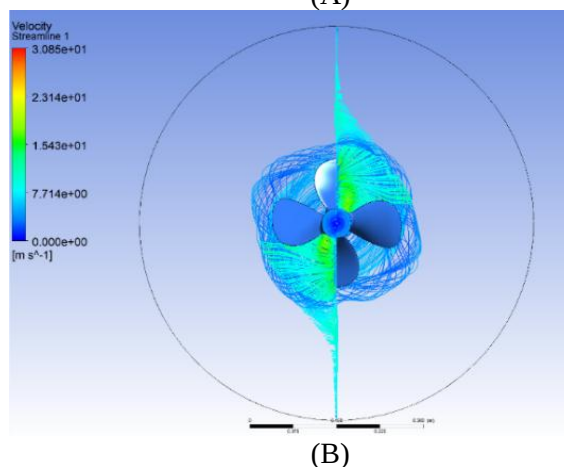
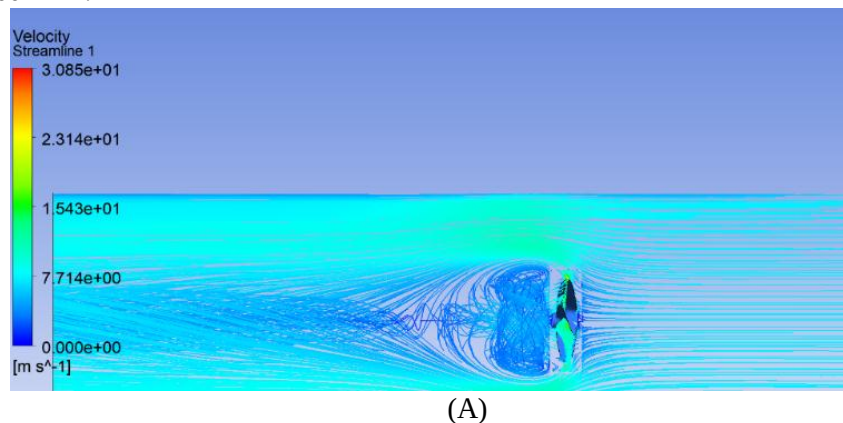


(B)

Gambar 4.41 Result *Streamline* Propeller Wageningen B-Series 1500 RPM: (A) Tampak Samping *Propeller*; (B) Tampak Depan *Propeller*

Gambar 4.41 menampilkan hasil *Streamline* pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 1500 RPM, menggambarkan pola aliran di sekitar propeller yang berpengaruh pada efisiensi dan kebisingan. Pada tampak samping (A), terlihat pusaran besar berwarna biru tua yang menunjukkan area dengan kecepatan aliran rendah, mengindikasikan tekanan rendah yang dapat meningkatkan resistansi aliran dan potensi kavitasi. Variasi warna dari hijau hingga biru muda di sepanjang bilah menunjukkan adanya kecepatan aliran sedang hingga rendah.

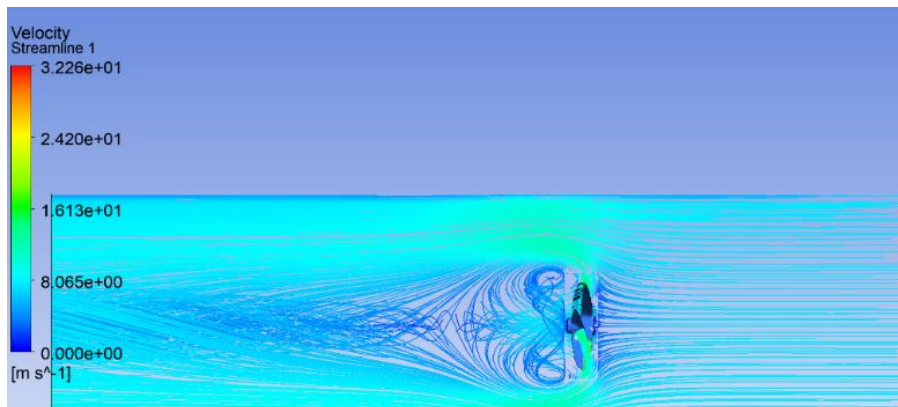
Gambar tampak depan (B), dominasi warna biru muda menunjukkan kecepatan aliran yang relatif rendah, mengindikasikan distribusi energi yang tidak optimal dan mengurangi efisiensi propeller. Warna hijau menunjukkan beberapa area dengan kecepatan sedang, namun secara keseluruhan efisiensi konversi energi menjadi dorongan tampak tidak maksimal. Keberadaan pusaran besar di dekat propeller dapat menjadi sumber utama kebisingan akibat tekanan rendah dan turbulensi, yang menghasilkan fluktuasi tekanan yang menyebabkan noise, terutama pada frekuensi rendah. Pola aliran ini menunjukkan bahwa propeller mungkin tidak optimal dalam memanfaatkan energi, dengan sebagian aliran kehilangan energi dalam bentuk pusaran dan area tekanan rendah, yang membatasi efisiensi pada kecepatan 1500 RPM.



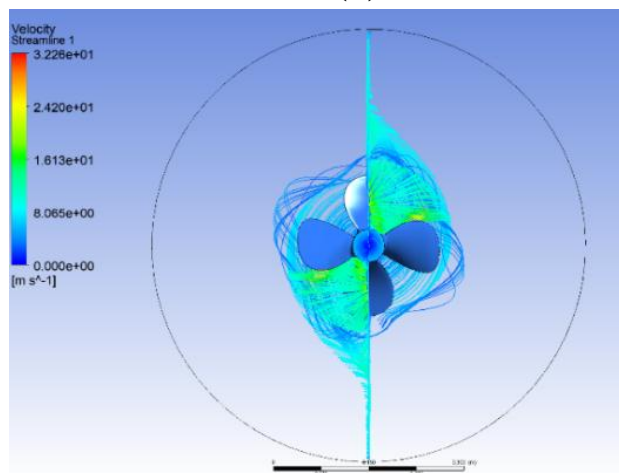
Gambar 4.42 *Result Streamline* Propeller Wageningen B-Series 1800 RPM: (A) Tampak Samping *Propeller*; (B) Tampak Depan *Propeller*

Gambar 4.42 menunjukkan hasil *Streamline* pada Propeller Wageningen B-Series dengan kecepatan 1800 RPM, memberikan gambaran pola aliran yang berbeda dibandingkan dengan 1500 RPM di Gambar 4.41. Pada tampak samping (A), terlihat pusaran besar berwarna biru tua yang lebih padat, menunjukkan peningkatan turbulensi dan distribusi tekanan yang tidak merata, yang dapat mengurangi efisiensi dorongan dan meningkatkan risiko kavitasi.

Gambar tampak depan (B), aliran didominasi oleh warna hijau dan biru muda, dengan warna hijau menunjukkan kecepatan sedang dan biru muda menunjukkan area dengan kecepatan lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa propeller menghasilkan variasi kecepatan yang lebih besar, berpotensi meningkatkan drag dan menurunkan efisiensi dibandingkan dengan kecepatan 1500 RPM. Peningkatan kecepatan rotasi juga berpotensi meningkatkan noise akibat turbulensi dan fluktuasi tekanan yang lebih besar. Secara keseluruhan, Gambar 4.42 mengindikasikan bahwa pada 1800 RPM, efisiensi propeller mungkin menurun karena energi lebih banyak digunakan untuk menghasilkan turbulensi daripada dorongan yang efisien.



(A)

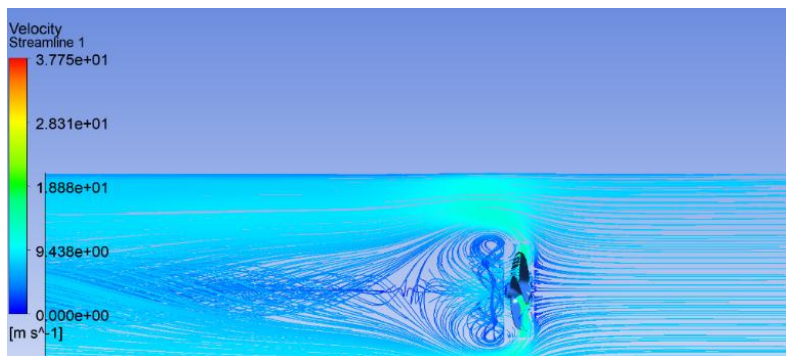


(B)

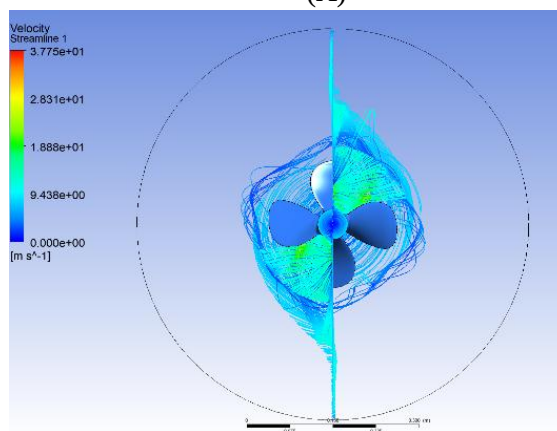
Gambar 4.43 *Result Streamline* Propeller Wageningen B-Series 2400 RPM: (A) Tampak Samping *Propeller*; (B) Tampak Depan *Propeller*

Gambar 4.43 menunjukkan hasil *Streamline* untuk Propeller Wageningen B-Series pada kecepatan 2400 RPM, yang memperlihatkan perbedaan mencolok dibandingkan Gambar 4.42 pada 1800 RPM. Pada tampak samping (A), pusaran di dekat propeller lebih besar tetapi kurang padat, menunjukkan aliran yang lebih tersebar dan stabil dengan dominasi warna biru tua, mengindikasikan kecepatan sedang hingga tinggi. Sementara itu, tampak depan (B) menunjukkan aliran dengan warna biru muda dan hijau, di mana warna hijau yang lebih banyak menunjukkan area dengan kecepatan tinggi di sekitar bilah propeller, berpotensi meningkatkan dorongan tetapi juga resistansi.

Hasil analisis *noise*, meskipun pusaran di Gambar 4.43 lebih besar, kepadatannya yang lebih rendah dapat mengurangi potensi kebisingan dibandingkan pusaran padat di Gambar 4.42, yang cenderung meningkatkan fluktuasi tekanan dan risiko kavitasi. Dalam hal efisiensi, Gambar 4.43 menunjukkan bahwa pada kecepatan 2400 RPM, propeller masih mampu mempertahankan aliran yang stabil meskipun ada peningkatan resistansi. Dibandingkan dengan Gambar 4.42, di mana pusaran padat menunjukkan potensi kehilangan energi lebih besar melalui turbulensi, aliran yang lebih tersebar di Gambar 4.43 dapat membantu meningkatkan efisiensi dorongan dengan mengurangi drag secara keseluruhan.



(A)

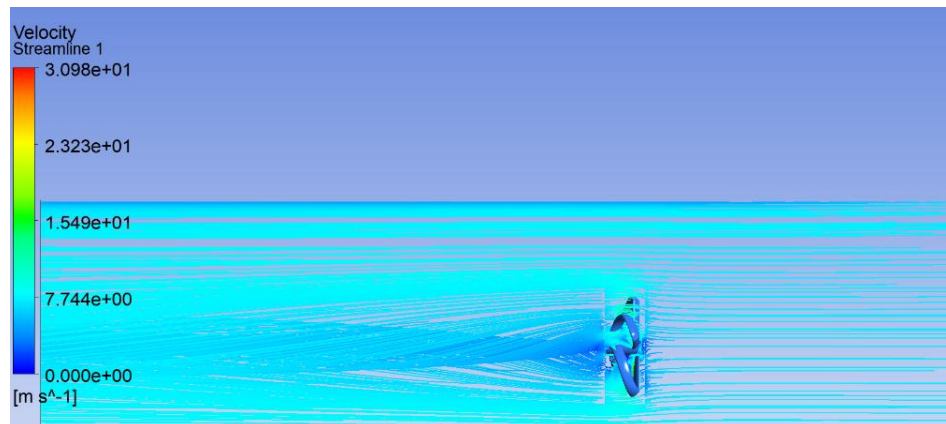


(B)

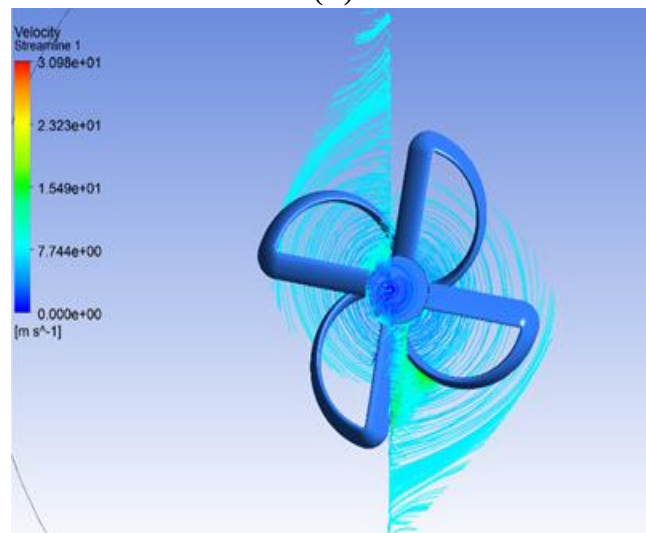
Gambar 4.44 Result *Streamline* Propeller Wageningen B-Series 3000 RPM: (A) Tampak Samping *Propeller*; (B) Tampak Depan *Propeller*

Gambar 4.44 menunjukkan *Streamline* pada Propeller Wageningen B-Series di 3000 RPM. Pada tampak samping (A), ukuran pusaran sama dengan di 2400 RPM (Gambar 4.43), tetapi lebih padat, menandakan turbulensi yang lebih besar akibat peningkatan energi kinetik. Warna biru tua hingga biru muda menunjukkan kecepatan aliran tinggi yang berkurang seiring jarak dari propeller. Kerapatan pusaran yang lebih tinggi di 3000 RPM meningkatkan risiko kavitasi dan noise. Tampak depan (B) menunjukkan aliran yang lebih merata dengan warna hijau lebih dominan dibandingkan 2400 RPM, menandakan kecepatan aliran yang lebih tinggi. Meskipun ini dapat meningkatkan dorongan, peningkatan *drag* dan turbulensi berpotensi mengurangi efisiensi propeller pada kecepatan tinggi.

B. Result *Streamline* Propeller Toroidal



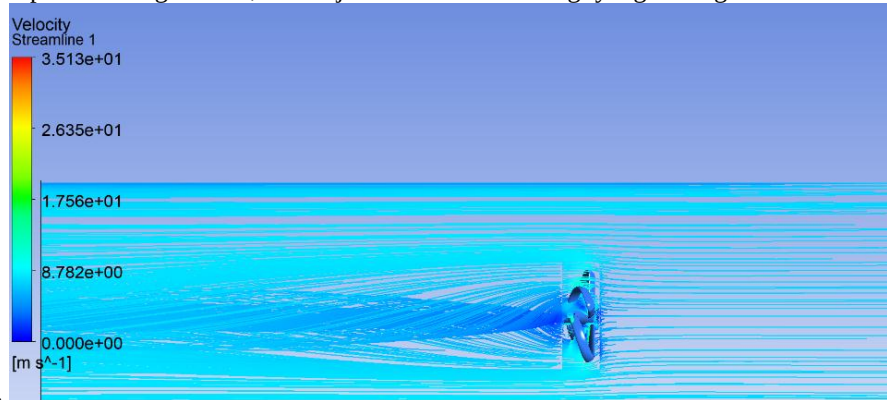
(A)



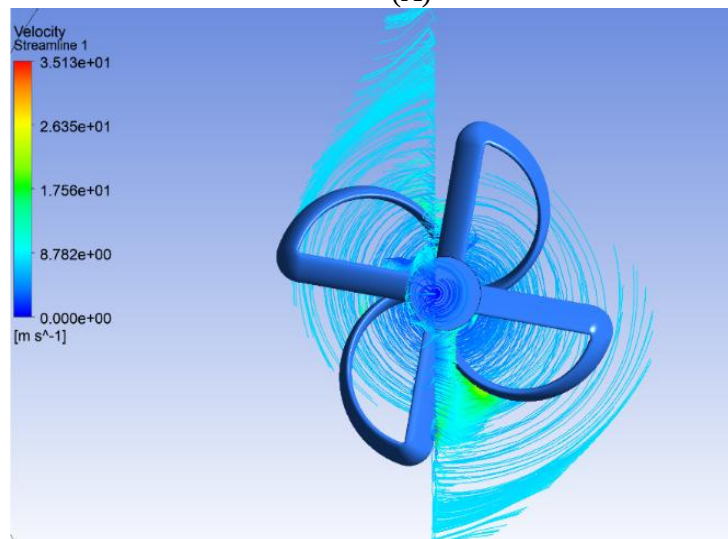
(B)

Gambar 4.45 Result *Streamline* Propeller Toroidal 1500 RPM: (A) Tampak Samping Propeller; (B) Tampak Depan Propeller

Gambar 4.45 menunjukkan hasil *Streamline* untuk Propeller Toroidal pada kecepatan 1500 RPM. Pada tampak samping (A), terlihat pusaran kecil di dekat propeller yang membesar ke belakang, dengan warna biru tua mendominasi, menandakan kecepatan aliran yang rendah. Hal ini menunjukkan aliran yang lebih stabil dibandingkan dengan Propeller Wageningen B-Series pada Gambar 4.41 (A), yang memiliki pusaran besar dan tekanan rendah, berpotensi meningkatkan resistansi dan mengurangi efisiensi. Tampak depan (B) menunjukkan aliran yang didominasi oleh warna biru tua dan sedikit hijau, mengindikasikan kecepatan aliran yang stabil dan rendah. Ini berbeda dengan Gambar 4.41 (B), di mana lebih banyak area dengan kecepatan sedang terlihat, menunjukkan distribusi energi yang kurang efisien.



(A)

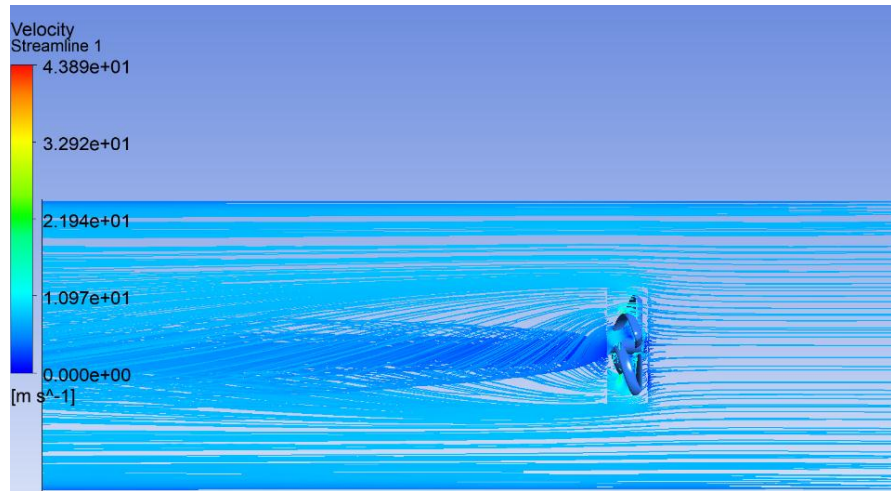


(B)

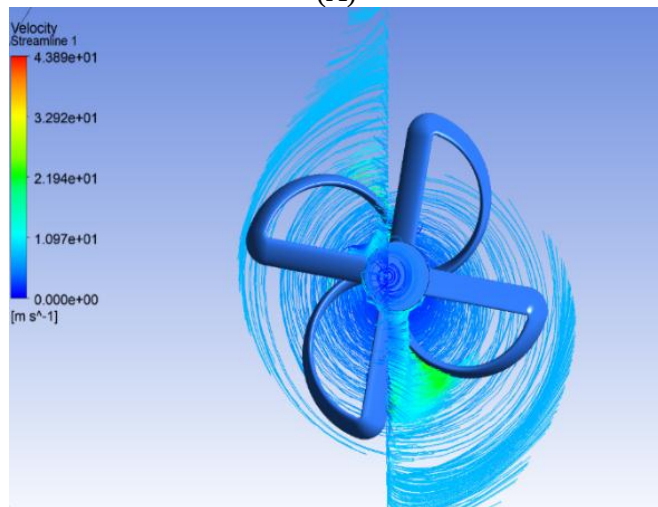
Gambar 4.46 Result *Streamline* Propeller Toroidal 1800 RPM: (A) Tampak Samping Propeller; (B) Tampak Depan Propeller

Gambar 4.46 menunjukkan hasil *Streamline* untuk Propeller Toroidal pada kecepatan 1800 RPM. Dibandingkan dengan Gambar 4.45 (1500 RPM) dan Gambar 4.42 (Propeller Wageningen B-Series pada 1800 RPM), terdapat perbedaan signifikan dalam pola aliran, efisiensi, dan *noise*. Pada tampak samping (A), terlihat bahwa

pusaran kecil di dekat propeller membesar saat bergerak ke belakang, meskipun masih lebih terkontrol dibandingkan pusaran besar pada Propeller Wageningen B-Series. Ini menunjukkan bahwa Propeller Toroidal dapat mengendalikan aliran lebih baik meskipun pada kecepatan yang lebih tinggi. Tampak depan (B) menunjukkan aliran yang didominasi oleh warna biru tua dan biru muda, menandakan stabilitas aliran yang lebih baik dibandingkan dengan Gambar 4.45, di mana warna hijau hampir tidak terlihat. Meskipun pada Gambar 4.42 terdapat lebih banyak warna hijau, Propeller Toroidal tetap mempertahankan aliran yang stabil dan terkontrol, penting untuk mengurangi drag dan meningkatkan efisiensi.



(A)

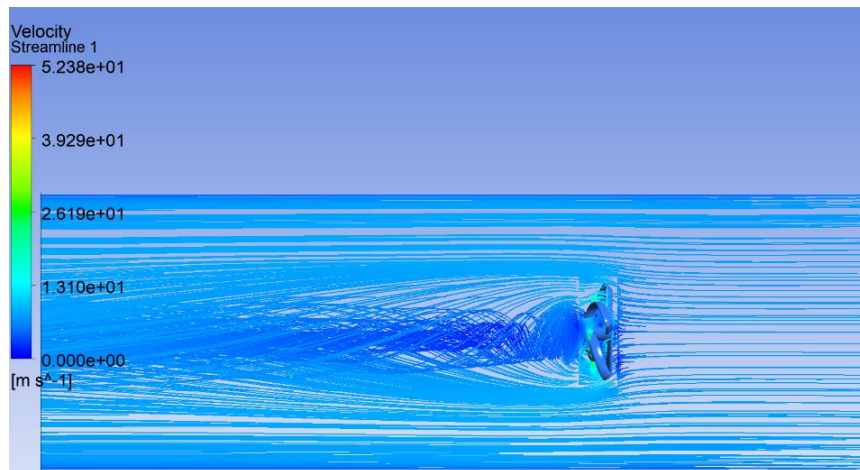


(B)

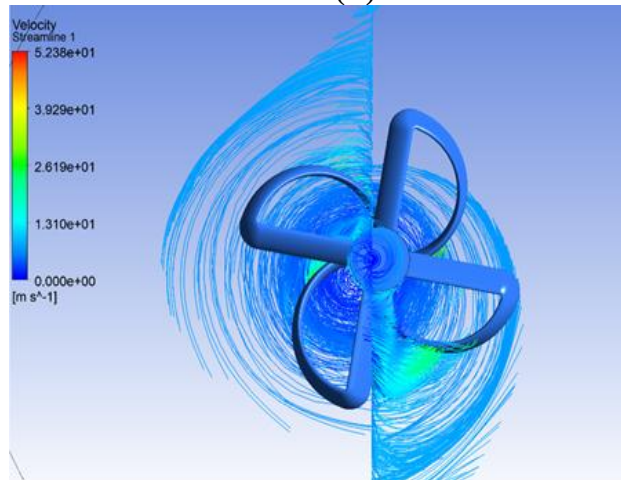
Gambar 4.47 *Result Streamline* Propeller Toroidal 2400 RPM: (A) Tampak Samping Propeller; (B) Tampak Depan Propeller

Gambar 4.47 menunjukkan hasil *Streamline* untuk Propeller Toroidal pada kecepatan 2400 RPM. Dibandingkan dengan Gambar 4.46 (1800 RPM) dan Gambar

4.43 (Propeller Wageningen B-Series pada 2400 RPM), terdapat perbedaan signifikan dalam pola aliran yang mempengaruhi efisiensi dan potensi noise. Pada tampak samping (A), pusaran kecil di dekat propeller membesar saat bergerak ke belakang, menunjukkan peningkatan turbulensi dan energi kinetik. Meskipun ukuran pusaran lebih besar dibandingkan dengan 1800 RPM, Propeller Toroidal menunjukkan peningkatan yang lebih bertahap dibandingkan dengan pusaran besar pada Propeller Wageningen B-Series. Warna aliran menunjukkan dominasi biru tua yang berubah menjadi biru muda, menandakan aliran yang stabil meskipun ada area turbulensi yang lebih besar dibandingkan pada 1800 RPM. Tampak depan (B) menunjukkan aliran yang stabil dan terkontrol dengan dominasi warna biru tua dan biru muda, berbeda dengan Gambar 4.43 yang menunjukkan lebih banyak warna hijau, yang berpotensi meningkatkan drag dan mengurangi efisiensi.



(A)

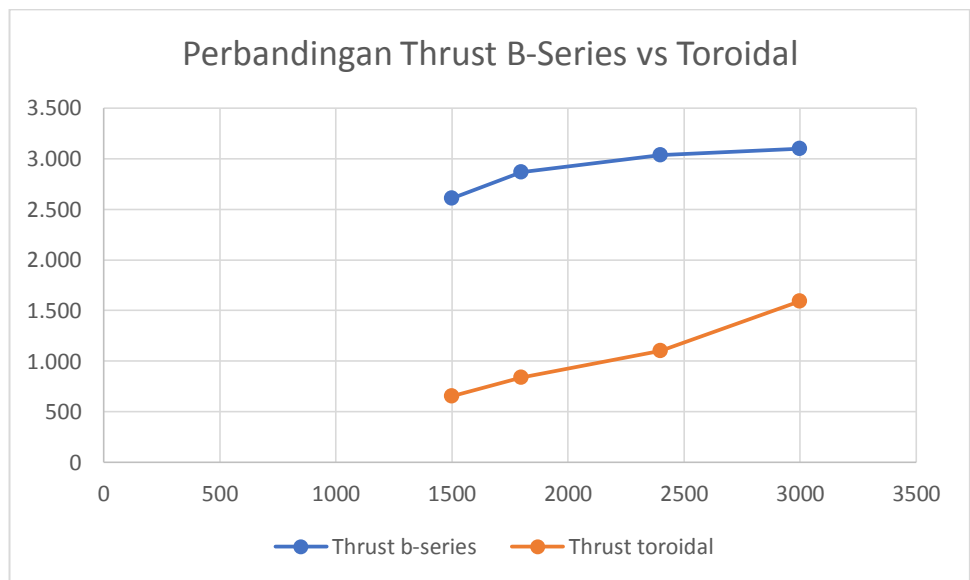


(B)

Gambar 4.48 Result Streamline Propeller Toroidal 3000 RPM: (A) Tampak Samping *Propeller*; (B) Tampak Depan *Propeller*

Gambar 4.48 menunjukkan hasil *Streamline* untuk Propeller Toroidal pada kecepatan 3000 RPM. Pada tampak samping (A), pusaran di sekitar propeller lebih besar dibandingkan dengan Gambar 4.47 (2400 RPM), yang menunjukkan akumulasi turbulensi yang menyebar lebih jauh dari propeller. Ini berbeda dengan Gambar 4.44 (Propeller Wageningen B-Series pada 3000 RPM), di mana pusaran besar dekat propeller semakin kecil saat menjauh, menunjukkan pola distribusi energi kinetik yang berbeda. Warna aliran di Gambar 4.48 (A) didominasi oleh biru tua di dekat propeller, menandakan kecepatan tinggi, dan beralih ke biru muda saat menjauh, menunjukkan penurunan kecepatan. Pola ini mirip dengan Gambar 4.47, tetapi dengan pusaran yang lebih besar. Pada tampak depan (B), aliran didominasi oleh biru muda dengan sedikit hijau, menunjukkan distribusi aliran yang lebih merata dibandingkan dengan Propeller Wageningen, yang dapat mengurangi noise. Meskipun ukuran pusaran lebih besar pada 3000 RPM, Propeller Toroidal memiliki pola aliran yang lebih stabil, yang dapat meningkatkan efisiensi.

4.4.4 Result Simulasi Thrust Dan Torque Antara Propeller Wageningen B-Series Dan Toroidal Propeller



Gambar 4.49 Grafik Perbandingan *Thrust* Propeller Wageningen B-Series Vs *Toroidal Propeller*

Dari Gambar 4.53 dapat di analisis perbandingan *Thrust* antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*.

Perhitungan dan Analisis:

a) Pada 1500 RPM

Diketahui:

- *Thrust* B-Series: 2610 N

- *Thrust* Toroidal: 654 N

Selisih *Thrust*:

$$\Delta Thrust = 2610 - 654 = 1956N$$

Perbandingan *Thrust*:

$$\frac{Thrust \text{ B-Series}}{Thrust \text{ Toroidal}} = \frac{2610}{654} = 3,99$$

Persentase *error*:

$$Error = \frac{2610 - 654}{654} \times 100 = 299,08\%$$

Pada 1500 RPM ini, *Thrust* B-Series hampir **4 kali lebih besar** dibandingkan *Toroidal Propeller*. Hal ini mengindikasikan bahwa desain konvensional B-Series memberikan performa dorong lebih baik pada kecepatan putar rendah, sementara *Toroidal Propeller* memiliki efisiensi *Thrust* yang jauh lebih rendah.

b) Pada 1800 RPM

Diketahui:

- *Thrust* B-Series: 2867 N
- *Thrust* Toroidal: 840 N

Selisih *Thrust*:

$$\Delta Thrust = 2867 - 840 = 2027N$$

Perbandingan *Thrust*:

$$\frac{Thrust \text{ B-Series}}{Thrust \text{ Toroidal}} = \frac{2867}{840} = 3,41$$

Persentase *error*:

$$Error = \frac{2867 - 840}{840} \times 100 = 241,31\%$$

Pada 1800 RPM, *Thrust* B-Series tetap dominan dengan perbedaan *Thrust* yang signifikan. Persentase *error* sebesar 241,31% menunjukkan bahwa B-Series jauh lebih unggul dalam memanfaatkan energi putaran untuk menghasilkan gaya dorong dibandingkan *Toroidal Propeller*.

c) Pada 2400 RPM

Diketahui:

- *Thrust* B-Series: **3036 N**
- *Thrust* Toroidal: **1104 N**

Selisih *Thrust*:

$$\Delta Thrust = 3036 - 1104 = 1932N$$

Perbandingan *Thrust*:

$$\frac{\text{Thrust B-Series}}{\text{Thrust Toroidal}} = \frac{3036}{1104} = 2,75$$

Persentase *error*:

$$\text{Error} = \frac{3036 - 1104}{1104} \times 100 = 175,17\%$$

Pada **2400 RPM**, meskipun *Thrust Toroidal Propeller* meningkat, *Thrust B-Series* tetap lebih besar dengan perbandingan sekitar **2,75 kali lebih unggul**. *Toroidal Propeller* masih menunjukkan performa yang lebih rendah akibat desain uniknya yang kurang optimal untuk menghasilkan gaya dorong pada putaran tinggi.

d) Pada 3000 RPM

Diketahui:

- *Thrust B-Series*: **3101 N**
- *Thrust Toroidal*: **1591 N**

Selisih *Thrust*:

$$\Delta \text{Thrust} = 3101 - 1591 = 1510 \text{ N}$$

Perbandingan *Thrust*:

$$\frac{\text{Thrust B-Series}}{\text{Thrust Toroidal}} = \frac{3101}{1591} = 1,95$$

Persentase *error* :

$$\text{Error} = \frac{3101 - 1591}{1591} \times 100 = 94,94\%$$

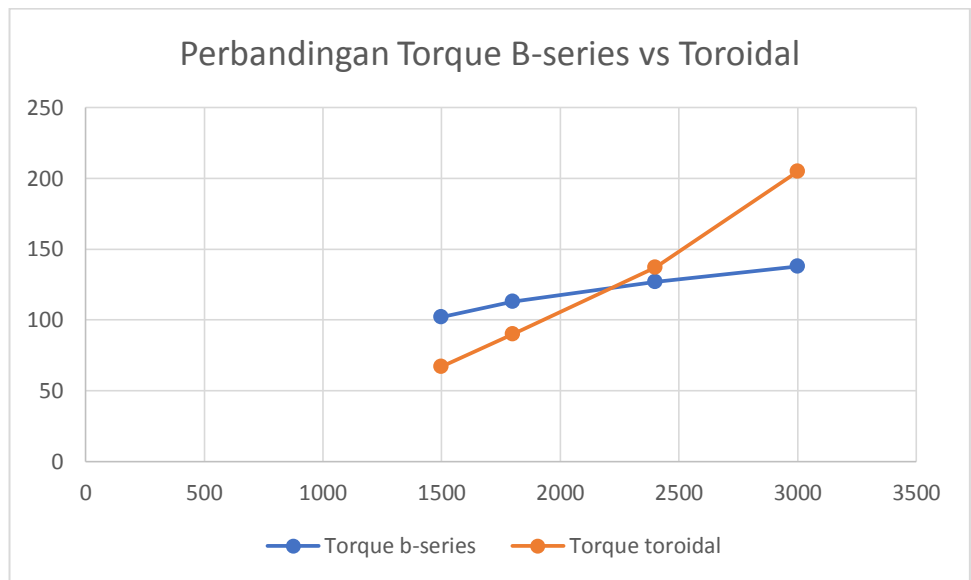
Pada RPM tertinggi, *Thrust Toroidal Propeller* menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan RPM sebelumnya. Namun, *Thrust B-Series* tetap lebih besar dengan selisih **1510 N** dan persentase *error* sebesar **94,94%**, yang menunjukkan dominasi B-Series dalam efisiensi gaya dorong pada putaran tinggi.

Tabel 4.11 Tabel presentase perbandingan *Thrust* (N) antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

RPM	<i>Thrust B-Series</i> (N)	<i>Thrust Toroidal</i> (N)	Selisih (N)	Perbandingan	Persentase <i>Error</i> (%)
1500	2610	654	1956	2,99	299.08
1800	2867	840	2027	2,41	241.31
2400	3036	1104	1932	1,75	175.17
3000	3101	1591	1510	0,95	94.94

Secara keseluruhan, *Thrust Wageningen B-Series* jauh lebih tinggi dibandingkan *Toroidal Propeller* pada semua tingkat RPM. Perbedaan *Thrust* terbesar terjadi pada **1500 RPM** dengan persentase *error* **299,08%**, sedangkan perbedaan terkecil terjadi pada **3000 RPM** dengan persentase *error* **94,94%**. Dominasi *Thrust* B-Series dipengaruhi oleh desain bilah konvensional yang lebih optimal dalam menghasilkan gaya dorong pada berbagai kondisi aliran fluida. Sebaliknya, *Toroidal Propeller* menunjukkan keterbatasan performa, terutama pada RPM rendah, meskipun *Thrust*-nya meningkat secara bertahap seiring bertambahnya kecepatan putar.

Toroidal Propeller lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan pengurangan kebisingan dan getaran, tetapi kurang kompetitif dalam menghasilkan gaya dorong dibandingkan B-Series. Sementara itu, B-Series menawarkan performa *Thrust* yang konsisten lebih tinggi dan lebih efisien untuk aplikasi yang memprioritaskan gaya dorong maksimum.



Gambar 4.50 Grafik Perbandingan *Torque Propeller Wageningen B-Series Vs Toroidal Propeller*

Berdasarkan Gambar 4.54 dapat di analisis perbandingan *Torque* antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*.

Perhitungan dan Analisis:

a) Pada 1500 RPM

Diketahui:

- *Torque* B-Series: 102 Nm
- *Torque* Toroidal: 67 Nm

Selisih *Torque*:

$$\Delta \text{Torque} = 102 - 67 = 35 \text{ Nm}$$

Perbandingan *Torque*:

$$\frac{\text{Torque B-Series}}{\text{Torque Toroidal}} = \frac{102}{67} = 1,52$$

Persentase *error* :

$$\text{Error} = \frac{102 - 67}{67} \times 100 = 52,24\%$$

Pada RPM ini, *Torque* B-Series lebih besar 52,24% dibandingkan *Toroidal Propeller*, dengan perbandingan sekitar 1,52 kali lebih tinggi. *Torque* B-Series cenderung lebih dominan karena desain bilahnya mampu menghasilkan momen puntir yang lebih besar untuk gaya dorong.

b) Pada 1800 RPM

Diketahui:

- *Torque* B-Series: 113,45 Nm
- *Torque* Toroidal: 90 Nm

Selisih *Torque*:

$$\Delta \text{Torque} = 113,45 - 90 = 23,45 \text{ Nm}$$

Perbandingan *Torque*:

$$\frac{\text{Torque B-Series}}{\text{Torque Toroidal}} = \frac{113,45}{90} = 1,26$$

Persentase *error* :

$$\text{Error} = \frac{113,45 - 90}{90} \times 100 = 26,06\%$$

Pada 1800 RPM, *Torque* B-Series tetap lebih besar dengan perbedaan 26,06%. Perbandingan *Torque* menurun dibandingkan RPM sebelumnya, menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar lebih berdampak pada peningkatan *Torque Toroidal Propeller*.

c) Pada 2400 RPM

Diketahui:

- *Torque* B-Series: 127,6 Nm
- *Torque* Toroidal: 137 Nm

Selisih *Torque*:

$$\Delta \text{Torque} = 127,6 - 137 = -9,4 \text{ Nm}$$

Perbandingan *Torque*:

$$\frac{\text{Torque Toroidal}}{\text{Torque B-Series}} = \frac{137}{127,6} = 1,07$$

Persentase *error*:

$$\text{Error} = \frac{137 - 127,6}{127,6} \times 100 = 7,37\%$$

Pada 2400 RPM, *Toroidal Propeller* menghasilkan *Torque* lebih tinggi sebesar 7,37% dibandingkan B-Series. Hal ini menunjukkan bahwa desain lingkaran penuh bilah *Toroidal* mulai memberikan keunggulan pada kecepatan putar yang lebih tinggi, meningkatkan kemampuan memutar fluida dengan momen puntir yang lebih besar.

d) Pada 3000 RPM

Diketahui:

- *Torque* B-Series: 138,58 Nm
- *Torque* *Toroidal*: 205 Nm

Selisih *Torque*:

$$\Delta \text{Torque} = 205 - 138,58 = 66,42 \text{ Nm}$$

Perbandingan *Torque*:

$$\frac{\text{Torque Toroidal}}{\text{Torque B-Series}} = \frac{205}{138,58} = 1,48$$

Persentase *error*:

$$\text{Error} = \frac{205 - 138,58}{138,58} \times 100 = 47,93\%$$

Pada 3000 RPM, *Torque Toroidal Propeller* meningkat secara signifikan, 47,93% lebih besar dibandingkan B-Series. Hal ini menunjukkan bahwa desain *Toroidal* menjadi lebih efisien dalam menghasilkan momen puntir pada RPM tinggi.

Tabel 4.12 Tabel persentase perbandingan *Torque* (Nm) antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

RPM	<i>Torque</i> B-Series (Nm)	<i>Torque</i> <i>Toroidal</i> (Nm)	Selisih (Nm)	Perbandingan	Persentase <i>Error</i> (%)
1500	102	67	35	1,52	52,24
1800	113,45	90	23,45	1,26	26,06
2400	127,6	137	-9,4	1,07	-7,37
3000	138,58	205	-66,42	1,48	-47,93

Pada RPM rendah (1500–1800 RPM), *Torque* Wageningen B-Series lebih dominan dibandingkan *Toroidal Propeller*, dengan selisih hingga 52,24%. Pada 2400 RPM, *Toroidal Propeller* mulai menunjukkan keunggulan, menghasilkan *Torque*

7,37% lebih besar dibandingkan B-Series. Pada 3000 RPM, *Toroidal Propeller* unggul secara signifikan, menghasilkan *Torque* yang 47,93% lebih besar dibandingkan B-Series. Performa *Torque Toroidal Propeller* meningkat seiring bertambahnya RPM, mengindikasikan bahwa desain bilah lingkaran penuh lebih cocok untuk aplikasi kecepatan putar tinggi.

4.4.5 Result Peforma Propeller

A. Rumus-Rumus:

1. Koefisien Advance (J):

$$J = \frac{V}{nD}$$

Dimana:

V adalah kecepatan kapal (7.456 m/s)

n adalah kecepatan putar propeller dalam revolusi per detik (RPS)

D adalah diameter propeller (0.22727 m)

Sumber:

- **Buku:** *Principles of Naval Architecture: Volume II - Resistance, Propulsion, and Vibration* oleh Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). [26]

2. Koefisien Dorong (KT):

$$KT = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

dimana:

T adalah dorong (N)

ρ adalah kepadatan air

Sumber:

- **Buku:** *Marine Propellers and Propulsion* oleh John Carlton..

3. Koefisien Torsi (KQ):

$$KQ = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

Dimana:

Q adalah torsi (Nm)

Sumber:

- **Buku:** *Marine Propellers and Propulsion* oleh John Carlton.

4. 10KQ:

$$10K_Q = 10 \times K_Q$$

Sumber:

- **Buku:** *HydroDynamics of Ship Propellers* oleh John P. Breslin dan P. Andersen. [27]

5. Efisiensi (η)

$$\eta = \frac{J \times K_T}{2\pi \times K_Q}$$

Sumber:

- **Buku:** *Principles of Naval Architecture: Volume II - Resistance, Propulsion, and Vibration* oleh SNAME. [26]

B. Perhitungan peforma propeller Wageningen B-Series

Perhitungan untuk 25 RPS (1500 RPM)

1. Advance Coefficient (J):

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{7.456}{25 \cdot 0.22727} \approx 1.311$$

2. Thrust Coefficient (K_T):

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = \frac{2610}{1000 \cdot 25^2 \cdot 0.22727^4}$$

$$K_T = \frac{2610}{1000 \cdot 625 \cdot 0.002656} = \frac{2610}{1.66} \approx 0.01231$$

3. Torque Coefficient (K_Q):

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{102}{1000 \cdot 25^2 \cdot 0.22727^5}$$

$$K_Q = \frac{102}{1000 \cdot 625 \cdot 0.000603} = \frac{102}{0.37688} \approx 0.00175$$

4. 10K_Q

$$10K_Q = 10 \cdot K_Q = 10 \cdot 0.00175 = 0.0175$$

5. Efisiensi Propeller η

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q} = \frac{1.311 \cdot 0.01231}{2\pi \cdot 0.00175} = \frac{0.01614}{0.010995} \approx 1.468$$

Perhitungan untuk 30 RPS (1800 RPM)

1. Advance Coefficient (J)

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{7.456}{30 \cdot 0.22727} \approx 1.093$$

2. Thrust Coefficient (K_T)

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = \frac{2867}{1000 \cdot 30^2 \cdot 0.22727^4}$$

$$K_T = \frac{2867}{1000 \cdot 900 \cdot 0.002656} = \frac{2867}{2.3904} \approx 0.01199$$

3. Terque Coefficient (KQ)

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{113.45}{1000 \cdot 30^2 \cdot 0.22727^5}$$

$$K_Q = \frac{113.45}{1000 \cdot 900 \cdot 0.000603} = \frac{113.45}{0.5427} \approx 0.00161$$

4. 10KQ

$$10K_Q = 10 \cdot 0.00161 = 0.0161$$

5. Efisiensi Propeller η

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q} = \frac{1.093 \cdot 0.01199}{2\pi \cdot 0.00161} = \frac{0.01309}{0.010116} \approx 1.294$$

Perhitungan untuk 40 RPS (2400 RPM)

1. Advance Coefficient (J)

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{7.456}{40 \cdot 0.22727} \approx 0.820$$

2. Thrust Coefficient (KT)

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = \frac{3036}{1000 \cdot 40^2 \cdot 0.22727^4}$$

$$K_T = \frac{3036}{1000 \cdot 1600 \cdot 0.002656} = \frac{3036}{4.2496} \approx 0.01038$$

3. Terque Coefficient (KQ)

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{127.6}{1000 \cdot 40^2 \cdot 0.22727^5}$$

$$K_Q = \frac{127.6}{1000 \cdot 1600 \cdot 0.000603} = \frac{127.6}{0.964416} \approx 0.00143$$

4. 10KQ

$$10K_Q = 10 \cdot 0.00143 = 0.0143$$

5. Efisiensi Propeller η

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q} = \frac{0.820 \cdot 0.01038}{2\pi \cdot 0.00143} = \frac{0.008512}{0.008978} \approx 0.948$$

Perhitungan untuk 50 RPS (3000 RPM)

1. Advance Coefficient (J)

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{7.456}{50 \cdot 0.22727} \approx 0.656$$

2. Thrust Coefficient (KT)

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = \frac{3101}{1000 \cdot 50^2 \cdot 0.22727^4}$$

$$K_T = \frac{3101}{1000 \cdot 2500 \cdot 0.002656} = \frac{3101}{6.64} \approx 0.00946$$

3. Terque Coefficient (KQ)

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{138.58}{1000 \cdot 50^2 \cdot 0.22727^5}$$

$$K_Q = \frac{138.58}{1000 \cdot 2500 \cdot 0.000603} = \frac{138.58}{1.5075} \approx 0.00133$$

4. 10KQ

$$10K_Q = 10 \cdot 0.00133 = 0.0133$$

5. Efisiensi Propeller η

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q} = \frac{0.656 \cdot 0.00946}{2\pi \cdot 0.00133} = \frac{0.00620576}{0.00836} \approx 0.742$$

Tabel 4.13 Tabel Peforma Propeller Wageningen B-Series Dalam Kondisi Kavitasi

Propeller	RPS	RPM	Thrust (N)	Torque (Nm)	J	KT	KQ	10KQ	Efisiensi
B-Series	25	1500	2610	102	1.311	0.01231	0.00175	0.0175	1.468
	30	1800	2867	113.45	1.093	0.01199	0.00161	0.0161	1.294
	40	2400	3036	127.6	0.820	0.01038	0.00143	0.0143	0.948
	50	3000	3101	138.58	0.656	0.00946	0.00133	0.0133	0.742

Berdasarkan data performa propeller Wageningen B-Series, *Thrust* meningkat dari 2610 N pada 1500 RPM menjadi 2867 N pada 1800 RPM (+9,84%), 3036 N pada 2400 RPM (+5,89%), hingga mencapai 3101 N pada 3000 RPM (+2,14%). Peningkatan *Thrust* cenderung menurun pada RPM tinggi, mengindikasikan potensi efek kavitasi. *Torque* juga menunjukkan tren kenaikan, yaitu dari 102 Nm pada 1500 RPM menjadi 113,45 Nm pada 1800 RPM (+11,22%), 127,6 Nm pada 2400 RPM (+12,48%), dan 138,58 Nm pada 3000 RPM (+8,59%).

Advance Coefficient (J) menurun signifikan dari 1,311 pada 1500 RPM menjadi 1,093 pada 1800 RPM (-16,62%), 0,820 pada 2400 RPM (-25%), hingga 0,656 pada 3000 RPM (-20%). Penurunan ini mengindikasikan bahwa propeller bekerja pada kondisi advance ratio rendah pada RPM tinggi. *Thrust Coefficient* (KT) menurun dari 0,01231 pada 1500 RPM menjadi 0,01199 pada 1800 RPM (-2,60%), 0,01038 pada 2400 RPM (-13,41%), hingga 0,00946 pada 3000 RPM (-8,86%).

Efisiensi propeller turun dari 1,468 pada 1500 RPM menjadi 1,294 pada 1800 RPM (-11,85%), 0,948 pada 2400 RPM (-26,72%), dan 0,742 pada 3000 RPM (-21,75%). Penurunan efisiensi yang signifikan pada RPM tinggi menunjukkan bahwa propeller bekerja kurang optimal, dengan resistensi fluida dan potensi kavitasi menjadi faktor utama yang memengaruhi kinerja. Secara keseluruhan, propeller lebih efisien pada RPM rendah hingga sedang (1500–1800 RPM).

C. Perhitungan peforma *Toroidal Propeller*

Perhitungan untuk baris Pertama

- RPS: 25
- RPM: 1500
- *Thrust* (N): 654
- *Torque* (Nm): 67

1. Konversi RPM ke RPS

$$RPS = \frac{1500}{60} = 25$$

2. Hitung J :

$$J = \frac{7.456}{25 \times 0.22727} = 1.312272$$

3. Hitung KT :

$$KT = \frac{654}{1000 \times 25^2 \times 0.22727^4} = 0.392220$$

4. . Hitung KQ:

$$KQ = \frac{67}{1000 \times 25^2 \times 0.22727^5} = 0.176801$$

5. Hitung 10KQ

$$10KQ = 10 \times 0.176801 = 1.768008$$

6. Hitung Efisiensi

$$\eta = \frac{1.312272 \times 0.392220}{2\pi \times 0.176801} = 0.463328$$

Perhitungan untuk baris Kedua

- RPS: 30
- RPM: 1800
- *Thrust* (N): 840
- *Torque* (Nm): 90

1. Konversi RPM ke RPS

$$RPS = \frac{1800}{60} = 30$$

2. Hitung J :

$$J = \frac{7.456}{30 \times 0.22727} = 1.093560$$

3. Hitung KT :

$$KT = \frac{840}{1000 \times 30^2 \times 0.22727^4} = 0.349839$$

4. Hitung KQ :

$$KQ = \frac{90}{1000 \times 30^2 \times 0.22727^5} = 0.164926$$

5. Hitung $10KQ$

$$10 KQ = 10 \times 0.164926 = 1.649261$$

6. Hitung Efisiensi

$$\eta = \frac{1.093560 \times 0.349839}{2\pi \times 0.164926} = 0.369183$$

Perhitungan untuk baris ketiga

- RPS: 40
- RPM: 2400
- *Thrust* (N): 1104
- *Torque* (Nm): 137

1. Konversi RPM ke RPS

$$RPS = \frac{2400}{60} = 40$$

2. Hitung J :

$$J = \frac{7.456}{40 \times 0.22727} = 0.820170$$

3. Hitung KT :

$$KT = \frac{1104}{1000 \times 40^2 \times 0.22727^4} = 0.258631$$

4. Hitung KQ :

$$KQ = \frac{137}{1000 \times 40^2 \times 0.22727^5} = 0.141218$$

5. Hitung $10KQ$

$$10 KQ = 10 \times 0.141218 = 1.412180$$

6. Hitung Efisiensi

$$\eta = \frac{0.820170 \times 0.258631}{2\pi \times 0.141218} = 0.239064$$

Perhitungan untuk baris keempat

- RPS: 50
- RPM: 3000
- *Thrust* (N): 1591
- *Torque* (Nm): 205

1. Konversi RPM ke RPS

$$RPS = \frac{3000}{60} = 50$$

2. Hitung J :

$$J = \frac{7.456}{50 \times 0.22727} = 0.656136$$

3. Hitung KT :

$$KT = \frac{1591}{1000 \times 50^2 \times 0.22727^4} = 0.238540$$

4. Hitung KQ :

$$KQ = \frac{205}{1000 \times 50^2 \times 0.22727^5} = 0.135239$$

5. Hitung $10KQ$

$$10 KQ = 10 \times 0.135239 = 1.352394$$

6. Hitung Efisiensi

$$\eta = \frac{0.656136 \times 0.238540}{2\pi \times 0.135239} = 0.184193$$

Tabel 4.14 Tabel Peforma *Toroidal Propeller* Dalam Kondisi Kavitasi

Propeller	RPS	RPM	Thrust (N)	Torque (Nm)	J	KT	KQ	10KQ	Efisiensi
Toroidal	25	1500	654	67	1.312272	0.392220	0.176801	1.768008	0.463328
	30	1800	840	90	1.093560	0.349839	0.164926	1.649261	0.369183
	40	2400	1104	137	0.820170	0.258631	0.141218	1.412180	0.239064
	50	3000	1591	205	0.656136	0.238540	0.135239	1.352394	0.184193

Sumber: Data Simulasi Penulis, 2024.

Berdasarkan data performa *Toroidal Propeller*, *Thrust* meningkat secara signifikan seiring bertambahnya RPM. Pada 1500 RPM, *Thrust* tercatat 654 N, kemudian naik menjadi 840 N pada 1800 RPM (+28,44%), 1104 N pada 2400 RPM (+31,43%), dan mencapai 1591 N pada 3000 RPM (+44,20% dibandingkan 2400 RPM). Peningkatan *Thrust* ini menunjukkan kemampuan *Toroidal Propeller* untuk mempertahankan performa dorong yang baik pada berbagai kecepatan putar.

Torque juga meningkat dari 67 Nm pada 1500 RPM menjadi 90 Nm pada 1800 RPM (+34,33%), 137 Nm pada 2400 RPM (+52,22%), hingga 205 Nm pada 3000 RPM (+49,64% dibandingkan 2400 RPM). Peningkatan *Torque* yang signifikan menunjukkan kebutuhan daya mesin yang lebih besar untuk mempertahankan *Thrust* pada RPM tinggi.

Advance Coefficient (J) menurun dari 1,312 pada 1500 RPM menjadi 1,094 pada 1800 RPM (-16,62%), 0,820 pada 2400 RPM (-25,03%), dan 0,656 pada 3000 RPM (-20,00%). Nilai *Thrust Coefficient* (KT) juga menunjukkan penurunan, yaitu dari 0,392 pada 1500 RPM menjadi 0,350 pada 1800 RPM (-10,71%), 0,259 pada 2400 RPM (-25,99%), dan 0,239 pada 3000 RPM (-7,57%).

Efisiensi propeller menunjukkan tren penurunan signifikan, dimulai dari 0,463 pada 1500 RPM menjadi 0,369 pada 1800 RPM (-20,30%), 0,239 pada 2400 RPM (-35,20%), hingga 0,184 pada 3000 RPM (-23,01% dibandingkan 2400 RPM). Penurunan efisiensi ini mengindikasikan peningkatan hambatan fluida dan potensi kavitasi pada RPM tinggi.

D. Hasil Analisis Persentase *Error* Perbandingan Peforma Propeller Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

Tabel 4.15 Tabel efisiensi Propeller Wageningen B-Series dan Toroidal
Propeller

RPM	η B-Series	η Toroidal
1500	1.468	0.463328
1800	1.294	0.369183
2400	0.948	0.239064
3000	0.742	0.184193

a) Perhitungan untuk 1500 RPM

Diketahui:

$$\eta_{B\text{-Series}} = 1.468, \eta_{\text{Toroidal}} = 0.463328$$

Hitung selisih efisiensi:

$$\Delta\eta = \eta_{B\text{-Series}} - \eta_{\text{Toroidal}}$$

$$\Delta\eta = 1.468 - 0.463328 = 1.004672$$

Bagi hasil selisih dengan efisiensi toroidal:

$$\text{Ratio} = \frac{\Delta\eta}{\eta_{\text{Toroidal}}}$$

$$\text{Ratio} = \frac{1.004672}{0.463328} = 2.1687$$

Kalikan hasilnya dengan 100 untuk mendapatkan persentase *error*:

$$\text{Error} (\%) = \left| \frac{1.468 - 0.463328}{0.463328} \right| \times 100$$

$$\text{Error} (\%) = \left| \frac{1.004672}{0.463328} \right| \times 100 \approx 216.87\%$$

b) Perhitungan untuk 1800 RPM

Diketahui:

$$\eta_{B\text{-Series}} = 1.294, \eta_{\text{Toroidal}} = 0.369183$$

Hitung selisih efisiensi:

$$\Delta\eta = 1.294 - 0.369183 = 0.924817$$

Bagi hasil selisih dengan efisiensi toroidal:

$$\text{Ratio} = \frac{\Delta\eta}{\eta_{\text{Toroidal}}}$$

$$\text{Ratio} = \frac{0.924817}{0.369183} = 2.5051$$

Kalikan hasilnya dengan 100 untuk mendapatkan persentase *error*:

$$Error (\%) = \left| \frac{1.294 - 0.369183}{0.369183} \right| \times 100$$

$$Error (\%) = \left| \frac{0.924817}{0.369183} \right| \times 100 \approx 250.51\%$$

c) Perhitungan untuk 2400 RPM

Diketahui:

$$\eta_{B-Series} = 0.948, \eta_{Toroidal} = 0.239064$$

Hitung selisih efisiensi:

$$\Delta\eta = 0.948 - 0.239064 = 0.708936$$

Bagi hasil selisih dengan efisiensi toroidal:

$$Ratio = \frac{\Delta\eta}{\eta_{Toroidal}}$$

$$Ratio = \frac{0.708936}{0.239064} = 2.9654$$

Kalikan hasilnya dengan 100 untuk mendapatkan persentase *error*:

$$Error (\%) = \left| \frac{0.948 - 0.239064}{0.239064} \right| \times 100$$

$$Error (\%) = \left| \frac{0.708936}{0.239064} \right| \times 100 \approx 296.54\%$$

d) Perhitungan untuk 3000 RPM

Diketahui:

$$\eta_{B-Series} = 0.742, \eta_{Toroidal} = 0.184193$$

Hitung selisih efisiensi:

$$\Delta\eta = 0.742 - 0.184193 = 0.557807$$

Bagi hasil selisih dengan efisiensi toroidal:

$$Ratio = \frac{\Delta\eta}{\eta_{Toroidal}}$$

$$Ratio = \frac{0.557807}{0.184193} = 3.0288$$

Kalikan hasilnya dengan 100 untuk mendapatkan persentase *error*:

$$Error (\%) = \left| \frac{0.742 - 0.184193}{0.184193} \right| \times 100$$

$$Error (\%) = \left| \frac{0.557807}{0.184193} \right| \times 100 \approx 302.88\%$$

Tabel 4.16 Tabel persentase error efisiensi Propeller Wageningen B-Series dan Toroidal Propeller

RPM	Efisiensi B-Series ($\eta_{B-Series}$)	Efisiensi Toroidal ($\eta_{Toroidal}$)	Selisih ($\Delta\eta$)	Ratio	Error (%)
1500	1.468	0.463328	1.004672	2.1687	216.87
1800	1.294	0.369183	0.924817	2.5051	250.51
2400	0.948	0.239064	0.708936	2.9654	296.54
3000	0.742	0.184193	0.557807	3.0288	302.88

Table 4.16 disajikan data mengenai persentase *error* efisiensi Propeller Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*. Pada 1500 RPM, efisiensi B-Series tercatat 1.468, jauh lebih tinggi dibandingkan *Toroidal Propeller* sebesar 0.463328. Selisih efisiensi mencapai 1.004672, dengan persentase *error* 216.87%. Hal ini menunjukkan keunggulan desain B-Series dalam menghasilkan daya dorong lebih optimal pada putaran rendah. Pada 1800 RPM, efisiensi B-Series menurun menjadi 1.294, sedangkan Toroidal hanya 0.369183. Selisih efisiensi sebesar 0.924817 menghasilkan persentase *error* sebesar 250.51%. Pada 2400 RPM, efisiensi B-Series adalah 0.948, lebih tinggi dibandingkan Toroidal yang hanya 0.239064. Selisih efisiensi sebesar 0.708936 dengan persentase *error* mencapai 296.54%. Pada 3000 RPM, efisiensi B-Series menurun ke 0.742, sementara Toroidal hanya 0.184193. Selisih efisiensi sebesar 0.557807 menghasilkan persentase *error* tertinggi, yaitu 302.88%. Efisiensi B-Series lebih terjaga karena desainnya mendukung performa tinggi, sedangkan Toroidal mengalami hambatan signifikan. B-Series unggul dengan efisiensi 2 hingga 3 kali lebih tinggi di semua kondisi RPM. ***Toroidal Propeller*, meskipun dirancang untuk mengurangi kebisingan dan getaran, menunjukkan efisiensi dorong yang jauh lebih rendah akibat desain lingkaran penuh yang kurang optimal pada kecepatan tinggi.**

4.4.6 Analisis Perbandingan Performa Propeller Wageningen B-Series dan Toroidal Propeller

Berdasarkan data yang diberikan, performa antara *Wageningen B-Series Propeller* dan *Toroidal Propeller* memiliki perbedaan signifikan dalam hal *Thrust*, *Torque*, advance coefficient, *Thrust Coefficient*, dan efisiensi pada berbagai tingkat putaran (RPM).

Thrust atau daya dorong pada Wageningen B-Series menunjukkan peningkatan seiring kenaikan RPM, namun peningkatan tersebut cenderung menurun pada kecepatan putaran yang lebih tinggi. *Thrust* meningkat dari 2610 N pada 1500 RPM menjadi 2867 N pada 1800 RPM (+9,84%), kemudian naik menjadi 3036 N pada 2400 RPM (+5,89%), dan mencapai 3101 N pada 3000 RPM (+2,14%). Penurunan laju peningkatan *Thrust* ini mengindikasikan bahwa pada RPM tinggi, resistensi fluida dan potensi kavitasi mulai memengaruhi performa dorong propeller. Sebaliknya, *Toroidal Propeller* menunjukkan peningkatan *Thrust* yang lebih signifikan dibandingkan B-Series. *Thrust* dimulai dari 654 N pada 1500 RPM, naik menjadi 840 N pada 1800 RPM (+28,44%), 1104 N pada 2400 RPM (+31,43%), dan mencapai 1591 N pada 3000 RPM (+44,20%). Hal ini menunjukkan bahwa *Toroidal Propeller* mampu

mempertahankan daya dorong yang baik, namun nilai *Thrust* yang dihasilkan masih jauh di bawah B-Series.

Parameter *Torque*, Wageningen B-Series menunjukkan kenaikan dari 102 Nm pada 1500 RPM menjadi 113,45 Nm pada 1800 RPM (+11,22%), naik lagi menjadi 127,6 Nm pada 2400 RPM (+12,48%), dan akhirnya mencapai 138,58 Nm pada 3000 RPM (+8,59%). Sementara itu, *Toroidal Propeller* mencatat peningkatan *Torque* yang lebih tajam, yaitu dari 67 Nm pada 1500 RPM menjadi 90 Nm pada 1800 RPM (+34,33%), kemudian naik menjadi 137 Nm pada 2400 RPM (+52,22%), dan 205 Nm pada 3000 RPM (+49,64%). Peningkatan *Torque* yang signifikan pada *Toroidal Propeller* menunjukkan kebutuhan daya mesin yang lebih besar untuk mempertahankan *Thrust* pada RPM tinggi, yang dapat menjadi kelemahan dalam aspek efisiensi energi.

Nilai *Advance Coefficient* (J) pada kedua propeller menurun seiring kenaikan RPM, yang menandakan propeller bekerja pada kondisi advance ratio yang lebih rendah. Pada Wageningen B-Series, J turun dari 1,311 pada 1500 RPM menjadi 1,093 pada 1800 RPM (-16,62%), kemudian 0,820 pada 2400 RPM (-25%), dan 0,656 pada 3000 RPM (-20%). Tren serupa terjadi pada *Toroidal Propeller*, di mana J turun dari 1,312 pada 1500 RPM menjadi 1,094 pada 1800 RPM (-16,62%), 0,820 pada 2400 RPM (-25,03%), dan 0,656 pada 3000 RPM (-20%).

Efisiensi propeller menjadi parameter kunci dalam perbandingan ini. Wageningen B-Series menunjukkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan *Toroidal Propeller* pada semua kondisi RPM. Efisiensi B-Series dimulai dari 1,468 pada 1500 RPM, turun menjadi 1,294 pada 1800 RPM (-11,85%), 0,948 pada 2400 RPM (-26,72%), dan 0,742 pada 3000 RPM (-21,75%). Sebaliknya, *Toroidal Propeller* hanya mencatat efisiensi 0,463 pada 1500 RPM, turun menjadi 0,369 pada 1800 RPM (-20,30%), 0,239 pada 2400 RPM (-35,20%), dan 0,184 pada 3000 RPM (-23,01%). Perbedaan efisiensi ini menghasilkan persentase *error* yang signifikan. Pada 1500 RPM, efisiensi B-Series 1,468 dibandingkan toroidal 0,463 menghasilkan *error* 216,87%. Pada 1800 RPM, selisih efisiensi 0,9248 menghasilkan *error* 250,51%, sementara pada 2400 RPM *error* mencapai 296,54%, dan pada 3000 RPM *error* tertinggi sebesar 302,88%.

4.4.7 Interpretasi dan Solusi Kegagalan *Thrust* pada *Toroidal Propeller*

Analisis Kegagalan *Thrust* pada *Toroidal Propeller*

Kegagalan *Thrust* pada *Toroidal Propeller* dibandingkan dengan Wageningen B-Series dapat dijelaskan dari aspek desain geometri dan performa operasional. Pada 1500 RPM, *Thrust Toroidal Propeller* tercatat sebesar 654 N, jauh lebih rendah dibandingkan *Thrust* Wageningen B-Series yang mencapai 2610 N. Perbedaan ini menunjukkan selisih *Thrust* sebesar 74.94%

$$\begin{aligned} \text{Error Thrust (\%)} &= \left| \frac{2610 - 654}{2610} \right| \times 100 \\ \text{Error Thrust (\%)} &= \left| \frac{1956}{2610} \right| \times 100\% \approx 74.94\% \end{aligned}$$

Hal ini mengindikasikan bahwa desain *Toroidal Propeller* belum optimal untuk menghasilkan gaya dorong yang setara. Salah satu penyebab utama adalah nilai *Expanded Area Ratio* (EAR) *Toroidal Propeller* yang lebih rendah, yaitu 0.639

dibandingkan 0.689 pada Wageningen B-Series, dengan selisih sebesar 7.26%. EAR yang lebih rendah pada *Toroidal Propeller* memengaruhi distribusi tekanan pada bilah, sehingga mengurangi kemampuan menghasilkan gaya angkat.

Selain itu, *blade area Toroidal Propeller* sebesar 25,942.52 mm² lebih kecil dibandingkan *blade area Wageningen B-Series* sebesar 27,924.18 mm², dengan perbedaan sebesar 7.10%. *Blade area* yang lebih kecil ini mengurangi luas bilah yang berinteraksi dengan aliran fluida, sehingga *Thrust* yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Parameter lain seperti sudut skew dan rake juga turut berkontribusi terhadap kegagalan *Thrust*. Sudut skew yang kurang optimal dapat menyebabkan distribusi aliran tidak merata di ujung bilah, sedangkan rake yang tidak sesuai meningkatkan hambatan pada trailing edge bilah

Solusi untuk permasalahan ini melibatkan beberapa langkah optimasi. Pertama, desain *Toroidal Propeller* perlu dimodifikasi dengan meningkatkan EAR mendekati nilai Wageningen B-Series. Selain itu, *blade area Toroidal Propeller* dapat diperbesar untuk meningkatkan interaksi fluida dengan bilah. Penyesuaian sudut skew dan rake juga diperlukan untuk mengurangi turbulensi di trailing edge dan meningkatkan efisiensi. Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) lanjutan dapat digunakan untuk mengevaluasi konfigurasi desain yang lebih baik.

A. Optimasi Desain Geometri

Optimalisasi EAR dan *blade area* pada *Toroidal Propeller*

Agar *Expanded Area Ratio* (EAR) dan *Blade Area Toroidal Propeller* mendekati atau sama dengan Wageningen B-Series, beberapa parameter desain seperti lebar bilah, panjang *chord*, dan jumlah bilah perlu disesuaikan. Berikut ini adalah perhitungan numerik untuk mencapai nilai yang diinginkan.

1) *Expanded Area Ratio* (EAR)

EAR dihitung menggunakan rumus:

$$EAR = \frac{A_E}{\pi D^2}$$

Di mana:

- A_E : Area bilah yang diperluas (Expanded Blade Area)
- D : Diameter propeller

Data awal:

- EAR *Toroidal Propeller* = 0.639
- EAR Wageningen B-Series = 0.689
- Diameter propeller (D) = 0.22727 m

Diperlukan penyesuaian untuk A_E *Toroidal Propeller* agar EAR sama dengan Wageningen B-Series:

$$A_E = EAR \times \pi D^2$$

- Untuk EAR *Toroidal Propeller* (target 0.689):

$$A_E = 0.689 \times \pi(0.22727)^2 = 0.11197\text{m}^2 = 11197\text{mm}^2$$

Perubahan yang diperlukan:

- Area bilah *Toroidal Propeller* awal (A_E) = $0.639 \times \pi(0.22727)^2 = 0.10389\text{m}^2 = 10389\text{mm}^2$
- Perbedaan area bilah (ΔA_E) = $11197 - 10389 = 808\text{mm}^2$

Penyesuaian:

Guna meningkatkan A_E , panjang *chord* bilah atau jumlah bilah (*blade number*, Z) dapat ditingkatkan. Jika jumlah bilah tetap ($Z=4$), maka panjang *chord* pada setiap bilah perlu ditambah sebesar:

$$\Delta c = \frac{\Delta A_E}{Z \times \text{mean radius}}$$

$$\text{Rata-rata radius bilah} = 0.75 \times 0.22727 = 0.17045\text{ m}$$

$$\Delta c = \frac{808}{4 \times 170.45} \approx 1.19\text{mm}$$

Panjang *chord* bilah perlu ditambah sebesar 1.19 mm untuk mencapai EAR yang sama dengan Wageningen B-Series.

2) Blade Area

Blade Area (A_B) dihitung dengan:

$$A_B = \text{EAR} \times \pi D^2$$

Untuk Wageningen B-Series:

$$A_B = 0.689 \times \pi(227.27)^2 = 27,924.18\text{mm}^2$$

Untuk *Toroidal Propeller* (target):

$$A_B = 27,924.18\text{mm}^2$$

Blade Area awal *Toroidal Propeller* adalah $25,942.52\text{ mm}^2$

$$\text{Perbedaan area bilah } (\Delta A_B) = 27,924.18 - 25,942.52 = 1,981.66\text{ mm}^2$$

Penyesuaian:

Sama seperti EAR, A_B dapat ditingkatkan dengan:

1. Menambah jumlah bilah (Z):

Jika panjang *chord* dan radius tetap, jumlah bilah perlu ditambah dari 4 menjadi:

$$Z' = \frac{27,924.18}{25,942.52} \times 4 = 4.31$$

Bilah harus ditambah menjadi 5 untuk menyamai A_B Wageningen B-Series.

2. Menambah panjang *chord*:

Panjang *chord* harus ditambah sebesar:

$$\Delta c = \frac{\Delta A_B}{Z \times \text{mean radius}} = \frac{1981.66}{4 \times 170.45} \approx 2.90 \text{ mm}$$

Jika jumlah bilah tetap, panjang *chord* perlu ditambah sekitar 2.90 mm.

Implementasi Data Baru EAR dan Blade Area untuk *Toroidal Propeller*

1) EAR Baru

Rumus EAR (*Expanded Area Ratio*):

$$EAR = \frac{A_E}{\pi D^2}$$

- A_E : Expanded Area propeller (dalam mm² atau m²)
- D : Diameter propeller (dalam mm atau m)

Langkah Perhitungan:

a. Expanded Area Baru (A_E):

Nilai EAR target adalah 0.689, sehingga:

$$A_E = EAR \times \pi D^2$$

Dengan:

- EAR = 0.689 (target sesuai Wageningen B-Series)
- $D = 227.27 \text{ mm} = 0.22727 \text{ m}$

Maka:

$$A_E = 0.689 \times \pi (0.22727)^2$$

$$A_E = 0.689 \times \pi \times 0.05164 = 0.689 \times 0.16237 = 0.11197 \text{ m}^2 = 11,197 \text{ mm}^2$$

b. Validasi EAR Baru:

Dengan $A_E = 11,197 \text{ mm}^2$, nilai EAR dihitung ulang:

$$EAR = \frac{11,197}{\pi (227.27)^2}$$

$$EAR = \frac{11,197}{\pi \times 51,642.72} = \frac{11,197}{162,387.86} \approx 0.689$$

Hasil:

Nilai EAR baru untuk *Toroidal Propeller* setelah penyesuaian adalah **0.689**, sama dengan Wageningen B-Series.

2) Blade Area Baru (A_B)

Blade Area (A_B) dihitung dengan rumus:

$$A_B = Z \times \int_{r_{hub}}^{r_{tip}} c(r) dr$$

Dimana:

- Z : Jumlah bilah
- r_{hub} = Jari-jari *hub propeller*
- r_{tip} = Jari-jari *tip propeller*
- $c(r)$: Panjang *chord* sebagai fungsi jari-jari

Data Baru yang Digunakan

1) Jumlah Bilah (Z):

- Jika bilah tetap: $Z = 4$
- Jika bilah ditambah: $Z = 5$

2) Diameter Propeller (D)

$$D = 227.27 \text{ mm} \Rightarrow r_{tip} = \frac{D}{2} = 113.635 \text{ mm}$$

Jari-jari (r_{hub}): $45.53/2 = 22.765 \text{ mm}$

3) Panjang *Chord* Baru (c):

- Tambahan *chord* 1.19 mm untuk EAR baru
- Tambahan *chord* 2.90 mm untuk Blade Area baru

4) *Blade Area* Target (dari Wageningen B-Series):

$$A_B = 27,924.18 \text{ mm}^2$$

Langkah Perhitungan

a) Asumsi Panjang *Chord* Konstan

Untuk perhitungan praktis, *chord* (c) dianggap konstan dari r_{hub} hingga r_{tip} .
Rumus Blade Area (A_B) dengan *chord* konstan:

$$A_B = Z \times c \times (r_{tip} - r_{hub})$$

b) Perhitungan *Chord* Baru

Jika jumlah bilah tetap ($Z = 4$):

$$c = \frac{A_B}{Z \times (r_{tip} - r_{hub})}$$

- $A_B = 27,924.18 \text{ mm}^2$
- $Z = 4$
- $r_{tip} = 113.635$
- $r_{hub} = 22.765$

$$c = \frac{27,924.18}{4 \times (113.635 - 22.765)}$$

$$c = \frac{27,924.18}{4 \times 90.87}$$

$$c = \frac{27,924.18}{363.48} \approx 76.81 \text{ mm}$$

Hasil:

Panjang *chord* baru yang dibutuhkan adalah 76.81 mm jika jumlah bilah tetap $Z = 4$.

c) Perhitungan dengan Jumlah Bilah Bertambah

Jika jumlah bilah ditambah menjadi $Z = 5$:

$$c = \frac{A_B}{Z \times (r_{\text{tip}} - r_{\text{hub}})}$$

Substitusi nilai:

- $Z = 5$

$$c = \frac{27,924.18}{5 \times (113.635 - 22.765)}$$

$$c = \frac{27,924.18}{5 \times 90.87}$$

$$c = \frac{27,924.18}{454.35} \approx 61.46 \text{ mm}$$

Hasil:

Panjang *chord* baru yang dibutuhkan adalah 61.46 mm jika jumlah bilah ditambah menjadi $Z = 5$.

d) Validasi Perhitungan *Blade Area* Baru

a. Jika $Z = 4$ dan $c = 76.81 \text{ mm}^2$:

$$A_B = Z \times c \times (r_{\text{tip}} - r_{\text{hub}})$$

$$A_B = 4 \times 76.81 \times 90.87$$

$$A_B = 4 \times 6,981.56 = 27,926.24 \text{ mm}^2$$

b. Jika $Z = 5$ dan $c = 61.46 \text{ mm}^2$:

$$A_B = 5 \times 61.46 \times 90.87$$

$$A_B = 5 \times 5,583.24 = 27,916.20 \text{ mm}^2$$

Jika jumlah bilah tetap ($Z = 4$), panjang *chord* harus dinaikkan menjadi 76.81 mm agar *Blade Area Toroidal Propeller* sama dengan *Wageningen B-Series* (27,924.18 mm²). Jika jumlah bilah ditambah menjadi ($Z = 5$) panjang *chord* cukup dinaikkan menjadi 61.46 mm untuk mencapai *Blade Area* yang sama.

Referensi

- Carlton, J. (2019). *Marine Propellers and Propulsion*. Elsevier.

- Kuiper, G. (2020). *Principles of Naval Architecture: Propulsion*. SNAME.
- ITTC (2017). *Propulsion Test Procedures*. International Towing Tank Conference.

1.5 Interpretasi Hasil Efisiensi Wageningen B-Series Propeller dan Toroidal Propeller Pada Industri Maritim

Wageningen B-Series Propeller merupakan salah satu desain propeller konvensional yang telah teruji dan banyak digunakan di industri maritim. Propeller ini dirancang dengan variasi geometri *blade* yang fleksibel untuk mengoptimalkan efisiensi hidrodinamis, *Thrust*, dan kinerja keseluruhan pada berbagai kondisi operasi (Oosterveld & van Oossanen, 1975). Di sisi lain, *Toroidal Propeller* yang dipatenkan oleh MIT (US 10,836,466 B2, tanggal paten 17 November 2020) dan Sharrow Marine (US 9,926,058 B2, tanggal paten 27 Maret 2018) menghadirkan inovasi melalui desain melingkar tertutup, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengurangi wake losses, vortex tip, serta kebisingan yang dihasilkan selama operasi. Kedua desain ini menawarkan pendekatan berbeda dalam menghadapi tantangan propulsi kapal modern (MIT, 2020; Sharrow Marine, 2018).

Wageningen B-Series unggul dalam fleksibilitas desainnya yang memungkinkan penyesuaian jumlah *blade*, area ratio, dan pitch untuk berbagai jenis kapal, serta memiliki efisiensi hidrodinamis yang teruji sehingga menjadi pilihan utama untuk aplikasi yang membutuhkan keandalan tinggi (Kuiper, 1992). Sebaliknya, *Toroidal Propeller* menawarkan keunggulan unik berupa pengurangan kebisingan dan getaran yang signifikan berkat eliminasi vortex tip *blade*, serta distribusi beban hidrodinamis yang lebih merata di sepanjang *blade*. Dengan desainnya yang inovatif, *Toroidal Propeller* memberikan solusi berkelanjutan yang mendukung efisiensi energi dan operasi yang lebih ramah lingkungan (MIT, 2020; Sharrow Marine, 2018). Kelebihan masing-masing desain ini menjadi dasar analisis untuk menentukan propeller yang lebih unggul dalam konteks efisiensi dan performa propulsi.

Tabel presentase perbandingan *Thrust* (N) antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

RPM	<i>Thrust</i> B-Series (N)	<i>Thrust</i> Toroidal (N)	Selisih (N)	Perbandingan	Persentase Error (%)
1500	2610	654	1956	2,99	299.08
1800	2867	840	2027	2,41	241.31
2400	3036	1104	1932	1,75	175.17
3000	3101	1591	1510	0,95	94.94

Tabel presentase perbandingan *Torque* (Nm) antara Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

RPM	<i>Torque</i> B-Series (Nm)	<i>Torque</i> Toroidal (Nm)	Selisih (Nm)	Perbandingan	Persentase Error (%)
1500	102	67	35	1,52	52,24
1800	113,45	90	23,45	1,26	26,06
2400	127,6	137	-9,4	1,07	-7,37
3000	138,58	205	-66,42	1,48	-47,93

Tabel persentase *error* efisiensi *Propeller* Wageningen B-Series dan *Toroidal Propeller*

RPM	Efisiensi B-Series ($\eta_{B-Series}$)	Efisiensi Toroidal ($\eta_{Toroidal}$)	Selisih ($\Delta\eta$)	Ratio	<i>Error</i> (%)
1500	1.468	0.463328	1.004672	2.1687	216.87
1800	1.294	0.369183	0.924817	2.5051	250.51
2400	0.948	0.239064	0.708936	2.9654	296.54
3000	0.742	0.184193	0.557807	3.0288	302.88

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada analisis efisiensi propulsi, *Toroidal Propeller* consistently menunjukkan nilai efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan *Wageningen B-Series Propeller* pada semua kecepatan rotasi (RPM). Selisih efisiensi propulsi ($\Delta\eta$) berkisar antara 0,557807 hingga 1,004672, dengan tingkat *error* yang meningkat dari 216,87% pada 1500 RPM hingga 302,88% pada 3000 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun inovasi desain toroidal menawarkan pengurangan wake losses, efisiensinya masih belum melampaui B-Series pada kecepatan tinggi.

Hasil analisis torsi, *Toroidal Propeller* menunjukkan kebutuhan torsi lebih rendah pada RPM rendah hingga sedang (1500 RPM dan 1800 RPM) dengan selisih masing-masing 35 Nm dan 23,45 Nm, yang menghasilkan persentase *error* positif sebesar 52,24% dan 26,06%. Menariknya, pada RPM tinggi (2400 RPM dan 3000 RPM), meskipun *Toroidal Propeller* mencatat nilai torsi lebih besar dibandingkan B-Series, desain ini menunjukkan distribusi torsi yang lebih stabil dan proporsional terhadap *Thrust* yang dihasilkan. Hal ini mengindikasikan bahwa *Toroidal Propeller* lebih unggul dalam menjaga kinerja mekanis secara efisien pada kecepatan tinggi, terutama dalam menghadapi beban hidrodinamis yang kompleks.

Analisis *Thrust* menunjukkan bahwa B-Series *Propeller* memiliki nilai *Thrust* yang jauh lebih tinggi dibandingkan *Toroidal Propeller* pada seluruh RPM yang dianalisis. Selisih *Thrust* terbesar terjadi pada 1500 RPM dengan nilai 1956 N (299,08%), sedangkan selisih terkecil tercatat pada 3000 RPM dengan nilai 1510 N (94,94%). Hal ini menguatkan keunggulan desain konvensional B-Series dalam menghasilkan gaya dorong yang lebih signifikan pada berbagai kecepatan operasi.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa *Wageningen B-Series Propeller* masih memiliki keunggulan yang lebih jelas dalam hal efisiensi propulsi dan kemampuan menghasilkan *Thrust*, terutama pada kecepatan tinggi. Namun, *Toroidal Propeller* unggul dalam hal torsi, terutama pada kondisi RPM tinggi, yang dapat menjadi pertimbangan penting untuk aplikasi tertentu dalam konteks operasional yang membutuhkan stabilitas dan distribusi beban mekanis yang lebih merata.

4.6 Implikasi Hasil Penelitian terhadap Desain Propeller di Masa Depan

Hasil penelitian ini memberikan implikasi signifikan terhadap desain propeller di masa depan. *Wageningen B-Series Propeller* terbukti lebih efisien pada berbagai kondisi operasional berkat desain geometrisnya yang optimal, seperti pitch ratio (P/D), rake angle (RA), dan skew angle (SA). Desain ini dapat menjadi acuan untuk propeller dengan kebutuhan *Thrust* tinggi dan efisiensi bahan bakar optimal.

Sementara itu, *Toroidal Propeller* memiliki potensi besar dalam mengurangi kebisingan dan tip vortex karena desain bilah tertutupnya. Namun, performa *Thrust* dan efisiensinya masih rendah. Optimasi Blade Area dan *Expanded Area Ratio* (EAR) dengan menyesuaikan panjang *chord* bilah atau menambah jumlah bilah menjadi solusi untuk meningkatkan performa. Dengan optimasi ini, *Toroidal Propeller* berpotensi menjadi pilihan ideal untuk kapal yang beroperasi di lingkungan sensitif kebisingan.

Penerapan simulasi CFD dalam penelitian ini menunjukkan pentingnya analisis hidrodinamis dan kavitasi dalam pengembangan desain propeller yang efisien dan inovatif. Kombinasi desain B-Series dan keunggulan *Toroidal Propeller* dapat menghasilkan propeller hibrida yang efisien dan minim kebisingan. Selain itu, penggunaan material komposit canggih akan mendukung pengembangan propeller masa depan yang lebih ringan, kuat, dan ramah lingkungan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”