

## ANALISIS KESESUAIAN VARIASI JUMLAH BILAH THRUSTER T200 TERHADAP LINTASAN KAPAL PROTOTIPE ATSV

**Vincentius Septian Dwi Saputra**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: vincentius.20028@mhs.unesa.ac.id

**Muhamad Syariffuddin Zuhrie**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: zuhrie@unesa.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah bilah pada *thruster* T200 terhadap kesesuaian lintasan operasi kapal prototipe *Autonomous Tourism Surface Vessel* (ATSV) tipe katamaran. Variasi jumlah bilah yang dikaji meliputi 2 bilah, 3 bilah, 4 bilah, dan 5 bilah, dengan konfigurasi 3 bilah sebagai desain acuan. Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Flow Simulation*. Parameter utama yang dianalisis meliputi *thrust*, torsi, dan pola aliran di hilir *thruster* untuk menentukan kecocokan masing-masing konfigurasi terhadap lintasan lurus, zig-zag, dan putar *around*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi 2 bilah menghasilkan *thrust* paling rendah, yaitu 7,15 N, sehingga tidak sesuai untuk kebutuhan operasi utama ATSV. Konfigurasi 3 bilah menghasilkan *thrust* sebesar 20,92 N dengan indeks T/Q tertinggi sebesar 45,5, sehingga paling sesuai untuk lintasan lurus karena memberikan keseimbangan terbaik antara dorongan dan beban putar. Konfigurasi 4 bilah menghasilkan *thrust* tertinggi, yaitu 26,84 N, serta pola aliran paling homogen, sehingga paling sesuai untuk lintasan zig-zag dan putar *around* yang memerlukan kemampuan manuver lebih tinggi. Sementara itu, konfigurasi 5 bilah menghasilkan *thrust* sebesar 25,95 N, namun tidak menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan konfigurasi 4 bilah. Dengan demikian, pemilihan jumlah bilah *thruster* T200 pada prototipe ATSV harus disesuaikan dengan kebutuhan lintasan operasi kapal, bukan semata-mata berdasarkan asumsi bahwa jumlah bilah yang lebih banyak selalu menghasilkan performa yang lebih baik.

**Kata kunci** : *Autonomous Tourism Surface Vessel*; *thruster* T200; jumlah bilah; *thrust*; lintasan operasi; simulasi CFD

### Abstract

*This study aims to analyze the effect of blade number variation on the suitability of the operational path of a catamaran-type Autonomous Tourism Surface Vessel (ATSV) prototype using a T200 thruster. The blade variations investigated were 2 blades, 3 blades, 4 blades, and 5 blades, with the 3-blade configuration used as the baseline design. The research employed a numerical simulation method based on Computational Fluid Dynamics (CFD) using SolidWorks Flow Simulation software. The main parameters analyzed were thrust, torque, and downstream flow pattern to determine the suitability of each configuration for straight, zig-zag, and turning-around paths. The simulation results show that the 2-blade configuration produced the lowest thrust, namely 7.15 N, and was therefore unsuitable for the main operational requirements of the ATSV. The 3-blade configuration produced a thrust of 20.92 N with the highest T/Q index of 45.5, making it the most suitable for straight paths because it provides the best balance between thrust and rotational load. The 4-blade configuration produced the highest thrust, namely 26.84 N, and the most homogeneous flow pattern, making it the most suitable for zig-zag and turning-around paths that require higher maneuverability. Meanwhile, the 5-blade configuration produced a thrust of 25.95 N, but did not show a significant advantage compared to the 4-blade configuration. Therefore, the selection of blade number for the T200 thruster on the ATSV prototype should be adjusted to the ship's operational path requirements, rather than based solely on the assumption that a greater number of blades will always produce better performance.*

**Keywords** : *Autonomous Tourism Surface Vessel*; T200 thruster; blade number; *thrust*; operational path; CFD simulation

### PENDAHULUAN

Perkembangan **autonomous surface vessel (ASV)** terus meningkat, terutama untuk kebutuhan **pemantauan lingkungan, survei perairan, transportasi cerdas, dan wisata air** pada wilayah tenang seperti danau, waduk, kanal, dan perairan pedalaman. Dalam pelayaran otonom modern, pengembangan ASV tidak hanya berfokus pada kemampuan bergerak otomatis, tetapi juga pada kemampuan mengikuti lintasan secara **aman, efisien, dan adaptif** terhadap kondisi lingkungan operasi.

Dalam konteks wisata air, konsep **Autonomous Tourism Surface Vessel (ATSV)** menjadi penting karena

kapal dituntut mampu menjalankan rute tertentu secara berulang untuk kegiatan patroli, observasi, maupun penelusuran area. Oleh karena itu, sistem propulsi dan navigasi ATSV harus mampu mendukung **stabilitas gerak pada lintasan lurus** serta **respons manuver saat perubahan haluan**. (Han et al., 2024; S. Li et al., 2022; Zhang, Dhyani, et al., 2025; Zhang, Zhang, et al., 2025)

Salah satu tantangan utama pengembangan **ATSV skala kecil** adalah pemilihan sistem propulsi yang mampu menghasilkan **stabilitas dan manuverabilitas** pada kecepatan rendah hingga menengah. Penelitian ini menggunakan prototipe **ATSV tipe katamaran** karena lambung ganda memiliki stabilitas lateral yang baik untuk

perairan tenang. Prototipe yang dikaji memiliki ukuran **panjang 84,96 cm, lebar 38,22 cm, tinggi 16,3 cm, dan displasemen sekitar 14,72 kg/m<sup>3</sup>**, dengan desain geometri ditampilkan pada **Gambar 1** sebagai dasar integrasi sistem propulsi dan analisis simulasi.

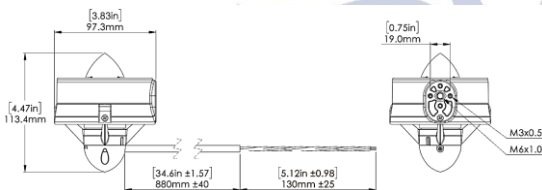


Gambar 1. Desain Prototipe Kapal ATSV tampak isometri

Dalam penelitian ini, jenis propulsor yang digunakan adalah **Blue Robotics T200 thruster**, yaitu *thruster* komersial yang banyak dipakai dalam riset kendaraan laut skala kecil. Bentuk fisik *thruster* T200 ditunjukkan pada **Gambar 2**, sedangkan bentuk geometri dua dimensinya ditampilkan pada **Gambar 3** untuk memperjelas komponen baling-baling dan rumah *thruster* yang menjadi objek simulasi. Pemilihan *thruster* T200 pada penelitian ini didasarkan pada kebutuhan akan sistem propulsi yang **kompak, mudah dimodelkan, dan relevan untuk platform ATSV skala kecil**.



Gambar 2. Thruster T200



Gambar 3. Gambar 2D Thruster T200

Dari sisi hidrodinamika, performa thruster dipengaruhi oleh geometri baling-baling, terutama **jumlah bilah**. Jumlah bilah berperan penting dalam menentukan **gaya dorong, torsi, distribusi tekanan, struktur wake, dan efisiensi konversi energi**. Kajian CFD telah banyak digunakan untuk menganalisis performa propulsor, namun sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada propeller konvensional, ducted propeller, atau rim-driven thruster dalam kondisi open water dan bollard condition, serta belum secara khusus meninjau **thruster T200 pada platform ATSV skala kecil**. Pada ATSV, kebutuhan propulsi tidak hanya ditentukan oleh besarnya gaya dorong, tetapi juga oleh **kesesuaian karakter dorong terhadap lintasan operasi kapal**. Pemilihan jumlah bilah yang kurang tepat dapat menyebabkan dorongan tidak mencukupi untuk manuver atau menghasilkan beban torsi berlebih pada operasi jelajah. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis variasi jumlah bilah **2, 3, 4, dan 5 bilah** pada thruster T200 menggunakan **SolidWorks Flow Simulation berbasis CFD**. (Han et al.,

2024; S. Li et al., 2022; Liu et al., 2024; Zhang, Zhang, et al., 2025)

Analisis dilakukan untuk memperoleh karakteristik **thrust, torsi, dan pola aliran** pada setiap konfigurasi. Hasil simulasi kemudian digunakan untuk menentukan konfigurasi bilah yang paling sesuai terhadap **lintasan lurus, zig-zag, dan putar around**, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis pemilihan jumlah bilah thruster T200 bagi pengembangan sistem propulsi **ATSV tipe katamaran skala kecil**.

## METODE

### 2.1 Lokasi, Waktu, dan Jenis Penelitian

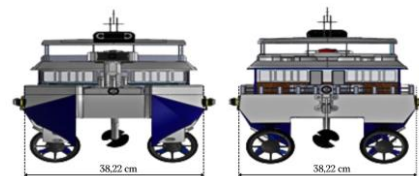
Penelitian ini merupakan **penelitian eksperimental numerik** berbasis simulasi komputer. Seluruh proses **pemodelan geometri**, penyusunan domain fluida, serta simulasi hidrodinamika dilakukan pada tahun 2025 dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* beserta modul *Flow Simulation* di perguruan tinggi peneliti. Pendekatan numerik dipilih karena mampu memberikan gambaran rinci mengenai **gaya dorong, torsi, distribusi tekanan, serta struktur aliran** tanpa harus langsung membuat seluruh variasi prototipe fisik pada tahap awal. Pada kajian propulsor laut modern, simulasi berbasis *computational fluid dynamics (CFD)* telah menjadi pendekatan yang umum digunakan untuk mengevaluasi performa *propeller, ducted propeller, dan thruster* sebelum dilakukan pengujian eksperimental. (Irannezhad et al., 2024; Jin et al., 2023; Lovibond et al., 2023)

### 2.2 Objek dan Subjek Penelitian

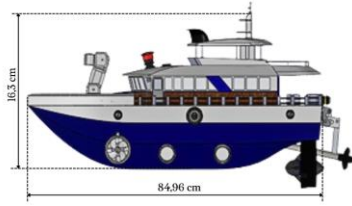
Objek utama penelitian ini adalah **sistem propulsi sekunder** berupa dua buah **thruster listrik Blue Robotics T200** yang dipasang pada prototipe **ATSV tipe katamaran**. Thruster T200 dipilih karena banyak digunakan pada **ROV, AUV, dan ASV skala kecil**, serta memiliki data teknis pabrikan yang cukup lengkap.

Penggunaan thruster kompak ini relevan dengan kebutuhan kendaraan laut kecil yang menuntut **ukuran ringkas, fleksibilitas pemasangan, dan kontrol dorong multi-arah**. Selain itu, geometri prototipe kapal tetap menjadi bagian penting karena memengaruhi konteks penerapan thruster. **Gambar 4 dan Gambar 5** digunakan sebagai acuan untuk menunjukkan desain kapal, konfigurasi lambung katamaran, posisi sistem propulsi, serta hubungannya dengan kebutuhan lintasan operasi.

Penggunaan *thruster* kompak seperti ini juga relevan dengan tren pengembangan sistem propulsi terintegrasi pada kendaraan laut kecil yang menuntut **ukuran ringkas, fleksibilitas pemasangan, dan kemampuan kontrol dorong multi-arah**. (Q. Li et al., 2020; Liu et al., 2023; Wu et al., 2023).



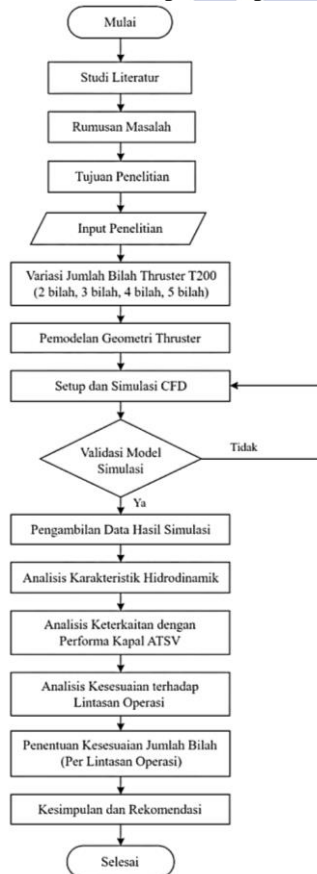
Gambar 4. Desain Prototipe Kapal ATSV tampak samping kiri dan kanan



Gambar 5. Desain Prototipe Kapal ATSV tampak depan

### 2.3 Diagram Alir Penelitian

Untuk memperjelas tahapan pelaksanaan penelitian, alur penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 6. Diagram alir ini menunjukkan urutan proses mulai dari **identifikasi objek penelitian, pengumpulan data teknis, pemodelan geometri, simulasi numerik, analisis hasil, hingga penarikan kesimpulan**. Penambahan diagram alir penelitian penting untuk menunjukkan bahwa penelitian dilaksanakan secara **sistematis, terstruktur, dan dapat direplikasi**.



Gambar 6. Diagram alir penelitian

Secara umum, tahapan penelitian meliputi: **(1)** identifikasi permasalahan dan penentuan objek penelitian, **(2)** pengumpulan data teknis *thruster* T200 dan prototipe ATSV, **(3)** pemodelan geometri variasi jumlah bilah, **(4)** penyusunan domain simulasi dan kondisi batas, **(5)** pelaksanaan simulasi menggunakan *SolidWorks Flow Simulation*, **(6)** pengolahan data numerik hasil simulasi, dan **(7)** analisis kesesuaian jumlah bilah terhadap lintasan operasi kapal.

### 2.4 Perangkat dan Bahan Penelitian

Perangkat dan bahan penelitian disusun mengikuti urutan yang konsisten dengan rancangan penelitian, yaitu:

#### 1. Perangkat lunak CAD/CAE

Perangkat lunak yang digunakan adalah **SolidWorks 2022** dengan modul *Flow Simulation* untuk pemodelan geometri dan simulasi aliran. Perangkat lunak ini dipilih karena mampu mendukung proses **pemodelan parametrik, pembentukan *rotating region*, visualisasi kontur tekanan, serta evaluasi gaya dan momen** pada sistem propulsi laut. Pendekatan simulasi berbasis *RANS* dengan kerangka acuan berputar seperti *multiple reference frame* atau *rotating region* juga banyak digunakan dalam kajian propeller dan *thruster* untuk memperoleh prediksi *thrust* dan torsi secara efisien. (Jin et al., 2023; Liu et al., 2023; Lovibond et al., 2023)

#### 2. Perangkat keras

Perangkat keras yang digunakan adalah komputer dengan minimal **prosesor *multi-core*, RAM  $\geq 16$  GB, dan kartu grafis** yang mendukung komputasi numerik, sehingga proses *meshing* dan simulasi dapat berjalan dengan stabil.

#### 3. Data teknis dan bahan pendukung

Data yang digunakan meliputi *datasheet* resmi *thruster Blue Robotics T200*, yang mencakup **tegangan operasi 7–20 V, *thrust* maksimum, arus penuh, ukuran fisik, dan material basah**, serta data desain dan tahanan prototipe ATSV dari dokumen perancangan internal.

### 2.5 Pemodelan Geometri Variasi Baling-Baling

Pemodelan geometri baling-baling dilakukan menggunakan modul *SolidWorks Part* dengan tahapan sebagai berikut:

#### 1. Rekonstruksi geometri dasar

Diameter baling-baling ditetapkan sebesar **76 mm** sesuai *datasheet* T200. Profil bilah (*airfoil section*), distribusi *chord*, dan *pitch* dasar diambil dari hasil pengukuran model *propeller* asli atau data *reverse engineering* yang tersedia, sehingga konfigurasi **3 bilah** diperlakukan sebagai **model acuan**.

#### 2. Pembuatan model 3 bilah (*baseline*)

Satu bilah dimodelkan pada bidang referensi dengan menggunakan fitur *loft* dan *sweep* untuk mengikuti distribusi *pitch* sepanjang radius. Bilah tersebut kemudian digandakan sebanyak tiga menggunakan fitur *circular pattern* pada sudut **120°**. Konfigurasi dasar ini dipertahankan sebagai acuan pembandingan untuk variasi jumlah bilah lainnya.

#### 3. Variasi jumlah bilah

Untuk konfigurasi **2 bilah**, fitur *circular pattern* diatur pada sudut **180°**. Untuk konfigurasi **4 bilah**, sudut antarbilah diatur **90°**. Untuk konfigurasi **5 bilah**, sudut antarbilah diatur **72°**. Pada seluruh model, **diameter *propeller*, distribusi *pitch*, dan profil bilah dipertahankan sama**, sehingga perbedaan performa yang diperoleh terutama mencerminkan **efek jumlah bilah**.

#### 4. Pemodelan *hub* dan *shroud thruster*

Bagian *hub* atau poros dan rumah baling-baling dimodelkan mengikuti dimensi utama T200. Sementara itu, *nozzle* atau rumah luar *thruster* dimodelkan sebagai *duct* berbentuk silinder-*elliptic* yang mengacu pada bentuk asli T200 untuk menangkap efek interaksi antara baling-

baling dan *duct*. Setiap konfigurasi baling-baling kemudian diekspor sebagai *part* terpisah untuk dianalisis lebih lanjut dalam modul *Flow Simulation*. (Cai et al., 2024)

## 2.6 Setup Domain dan Kondisi Batas Simulasi

Simulasi hidrodinamika dilakukan menggunakan **SolidWorks Flow Simulation**. Propeller ditempatkan dalam **domain fluida air tawar** dengan area **rotating region** di sekitar baling-baling dan domain luar sebagai **stationary frame**. Fluida yang digunakan adalah **air tawar** dengan densitas sekitar **1000 kg/m<sup>3</sup>** dan viskositas dinamis **0,001 Pa·s**, merepresentasikan kondisi perairan tenang seperti danau. Kondisi batas simulasi terdiri atas **inlet dengan kecepatan seragam**, **outlet tekanan lingkungan**, serta kondisi **no-slip wall** pada permukaan *duct* dan baling-baling. Simulasi menggunakan pendekatan **RANS** dengan model turbulensi bawaan SolidWorks, seperti **k-ε**, karena mampu memberikan keseimbangan antara akurasi hasil rata-rata aliran dan efisiensi komputasi. Mesh dibuat secara otomatis kemudian diperhalus pada area penting, yaitu **permukaan bilah**, **ujung bilah**, dan **wake region**. Uji independensi mesh dilakukan dengan membandingkan nilai **thrust dan torsi** pada beberapa tingkat kerapatan mesh, dan mesh dianggap memadai apabila perubahan nilai **thrust kurang dari 2–3%**.

## 2.7 Skenario Operasi dan Variasi Simulasi

Untuk memastikan kesesuaian antara hasil simulasi dengan kebutuhan analisis kapal, skenario simulasi disusun sebagai berikut:

### 1. Kalibrasi kondisi operasi untuk konfigurasi 3 bilah (*baseline*)

Berdasarkan *datasheet* T200, terdapat beberapa titik operasi utama pada tegangan **12 V**, **16 V**, dan **20 V**. Dalam simulasi, poros *propeller* diputar pada dua nilai utama, yaitu **1500 rpm** dan **3000 rpm**. Nilai ini digunakan untuk merepresentasikan **kondisi operasi sedang** dan **kondisi operasi maksimum**. Pemilihan beberapa titik operasi ini penting agar karakteristik *thruster* dapat dianalisis pada rentang kondisi yang representatif terhadap misi kapal.

### 2. Variasi jumlah bilah

Pada setiap nilai putaran, dilakukan simulasi untuk empat konfigurasi bilah, yaitu **2, 3, 4, dan 5 bilah**. Dengan demikian, seluruh konfigurasi dapat dibandingkan pada **kondisi putaran yang sama**. Pendekatan *comparative case study* seperti ini umum digunakan dalam simulasi propeller ketika fokus penelitian diarahkan pada pengaruh satu parameter geometrik tertentu. (Hu, Wan, Li, et al., 2024; Sinaga et al., 2022)

### 3. Variasi kecepatan aliran masuk

Kecepatan *inlet* divariasikan untuk merepresentasikan kondisi operasi *propeller* pada aliran maju. Variasi ini digunakan untuk melengkapi analisis karakteristik *thruster* dalam berbagai kondisi operasi yang representatif bagi ATSV. Dalam studi propulsor, perubahan kondisi aliran masuk penting karena dapat memengaruhi *advance ratio*, tekanan permukaan, dan performa dorong yang dihasilkan. (Irannezhad et al., 2024; Lovibond et al., 2023) Melalui skenario tersebut, diperoleh data performa

*thruster* pada berbagai kombinasi jumlah bilah dan kondisi operasi yang relevan dengan misi ATSV di perairan danau.

## 2.8 Parameter yang Diukur dan Cara Perolehan Data

Dari setiap simulasi, *SolidWorks Flow Simulation* menghasilkan data gaya dan momen yang bekerja pada *propeller*. Data ini kemudian diolah menjadi parameter sebagai berikut:

### 1. Thrust (T) dan torsi (Q)

*Thrust* diukur sebagai komponen gaya searah sumbu dorong pada permukaan baling-baling dan *duct*, sedangkan torsi merupakan momen puntir terhadap sumbu poros *propeller*. Kedua parameter ini merupakan indikator dasar yang paling umum digunakan dalam evaluasi performa propulsor laut.

### 2. Kecepatan putar (n)

Kecepatan putar diberikan sebagai *input* dalam satuan rpm pada *rotating region* dan dicatat untuk keperluan perhitungan daya dan parameter lain.

### 3. Daya poros (P<sub>shaft</sub>)

Daya poros dihitung dengan persamaan:

$$P_{shaft} = 2\pi nQ$$

dengan **n** dalam satuan putaran per detik. Persamaan ini digunakan untuk menghubungkan torsi hasil simulasi dengan kebutuhan daya mekanik poros pada tiap konfigurasi bilah.

### 4. Koefisien thrust (CT) dan koefisien torsi (CQ)

Parameter ini digunakan untuk menyatakan gaya dorong dan torsi dalam bentuk tak berdimensi, sehingga memungkinkan perbandingan performa pada kondisi operasi yang berbeda.

### 5. Advance coefficient (J)

Parameter ini digunakan untuk menggambarkan hubungan antara kecepatan aliran masuk dengan putaran dan diameter *propeller*. Dalam studi *open water performance*, parameter ini umum dipakai untuk mengevaluasi perubahan karakteristik dorong pada variasi kecepatan aliran.

### 6. Efisiensi propulsi (η)

Efisiensi propulsi dihitung berdasarkan hubungan antara *thrust*, daya poros, dan kondisi aliran masuk sesuai definisi standar *open water propeller*. Meskipun efisiensi bukan fokus akhir artikel ini, parameter ini tetap diperlukan pada tahap analisis awal untuk memahami kecenderungan performa tiap konfigurasi.

### 7. Distribusi tekanan dan kecepatan

Kontur tekanan statis pada permukaan bilah dan *duct* diekstrak untuk mengidentifikasi daerah tekanan minimum, sedangkan vektor dan kontur kecepatan di hilir *propeller* digunakan untuk melihat **pola aliran** dan *wake*.

## 2.9 Analisis Keterkaitan dengan Performa Kapal ATSV

Untuk menghubungkan hasil simulasi *thruster* dengan performa gerak ATSV, analisis dilakukan melalui tiga tahap. Pertama, **kurva tahanan kapal R(V)** digunakan sebagai dasar untuk menilai apakah gaya dorong *thruster* mampu menggerakkan kapal pada kondisi operasi tertentu. Kedua, **kecepatan jelajah** ditentukan dengan membandingkan kurva **thrust total thruster** dan **kurva tahanan kapal**, di mana titik potong keduanya menunjukkan estimasi kecepatan operasi ATSV.

Selanjutnya, hasil tersebut digunakan untuk menganalisis kesesuaian konfigurasi bilah terhadap kebutuhan misi. Setiap konfigurasi dievaluasi berdasarkan karakteristik thrust dan torsi untuk tiga jenis lintasan, yaitu lintasan lurus, lintasan zig-zag, dan lintasan berputar around.

### 2.10 Urutan Penyajian Hasil

Agar konsisten dengan tujuan penelitian, hasil penelitian nantinya dipaparkan dalam urutan sebagai berikut:

1. validasi model *thruster* T200 tiga bilah terhadap data *datasheet*,
2. perbandingan *thrust* dan torsi untuk konfigurasi 2, 3, 4, dan 5 bilah,
3. analisis parameter performa utama yang mendukung interpretasi hasil simulasi,
4. visualisasi pola aliran dan distribusi tekanan untuk menjelaskan karakter dorong masing-masing konfigurasi, dan
5. implikasi terhadap performa ATSV, terutama dalam menentukan kesesuaian setiap jumlah bilah terhadap lintasan lurus, zig-zag, dan putar *around*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil Simulasi

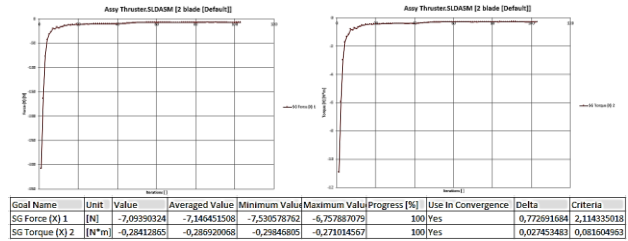
Sebagai dasar pelaksanaan simulasi, ringkasan skenario simulasi disajikan pada Tabel 1. Tabel tersebut menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi bilah dianalisis pada domain fluida, kondisi batas, dan model aliran yang sama, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung untuk menilai pengaruh jumlah bilah terhadap performa *thruster*.

Tabel 1. Ringkasan skenario simulasi *thruster* T200

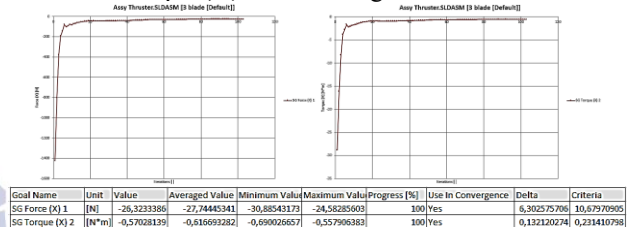
Kode kasus	Jumlah bilah	Kecepatan putar poros, n (rpm)	Fluida	Domain dan model aliran	Status hasil
K1	2 bilah	1500, 3000	Air tawar, $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$	SolidWorks Flow Simulation, RANS $k-\epsilon$ , rotating region	Konvergen
K2	3 bilah	1500, 3000			
K3	4 bilah	1500, 3000			
K4	5 bilah	1500, 3000			

#### 3.1.1 Konvergensi Solusi

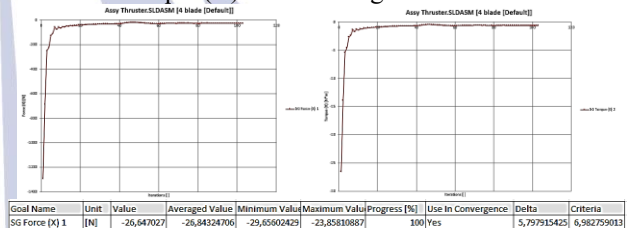
Sebelum analisis utama dilakukan, tingkat konvergensi simulasi pada setiap konfigurasi bilah terlebih dahulu ditinjau. Hasil goal plot menunjukkan bahwa seluruh simulasi telah mencapai kondisi konvergen, ditandai dengan Progress 100% dan nilai Delta lebih kecil dari Criteria. Kondisi ini menunjukkan bahwa solusi numerik telah berada pada keadaan steady state, sehingga data gaya dan momen rata-rata layak digunakan untuk analisis lanjutan. Kurva konvergensi pada Gambar 7 sampai Gambar 10 juga memperlihatkan kestabilan nilai SG Force (X) dan SG Torque (X). Dengan demikian, hasil simulasi dinyatakan memenuhi syarat dasar untuk dianalisis lebih lanjut pada aspek thrust, torsi, dan struktur aliran. (Irannezhad et al., 2024; Jin et al., 2023)



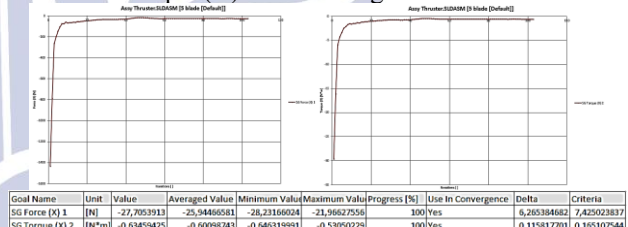
Gambar 7. Kurva konvergensi SG Force (X) dan SG Torque (X) untuk konfigurasi 2 bilah



Gambar 8. Kurva konvergensi SG Force (X) dan SG Torque (X) untuk konfigurasi 3 bilah



Gambar 9. Kurva konvergensi SG Force (X) dan SG Torque (X) untuk konfigurasi 4 bilah



Gambar 10. Kurva konvergensi SG Force (X) dan SG Torque (X) untuk konfigurasi 5 bilah

#### 3.1.2 Hasil Thrust dan Torsi Thruster T200

Hasil simulasi rata-rata thrust dan torsi untuk masing-masing variasi jumlah bilah disajikan pada Tabel 2. Nilai tersebut diperoleh pada kondisi kecepatan putar konstan  $n = 3000 \text{ rpm}$ , sehingga perbedaan hasil yang muncul dapat dihubungkan secara langsung dengan variasi jumlah bilah. Selain thrust dan torsi, juga ditampilkan indeks T/Q, yaitu rasio antara thrust dan torsi, yang digunakan untuk menggambarkan keseimbangan dorong terhadap beban putar.

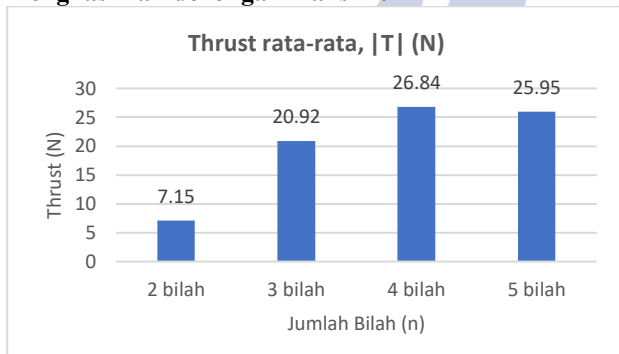
Tabel 2. Hasil simulasi thrust, torsi, dan indeks T/Q pada  $n = 3000 \text{ rpm}$

Jumlah bilah	Thrust rata-rata,  T  (N)	Torsi rata-rata,  Q  (N·m)	Indeks T/Q
2 bilah	7,15	0,29	24,9
3 bilah	20,92	0,46	45,5
4 bilah	26,84	0,61	43,8
5 bilah	25,95	0,60	43,2

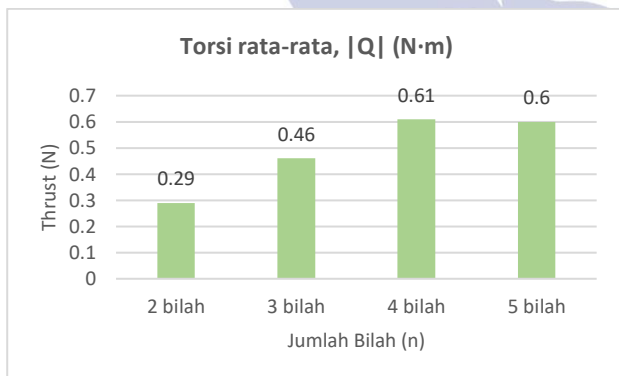
\*Catatan: Indeks T/Q merupakan rasio antara thrust dan torsi pada kondisi putaran yang sama, yang digunakan

sebagai indikator sederhana dorongan relatif terhadap beban putar.

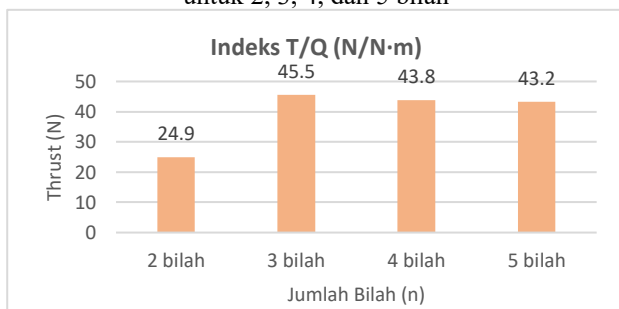
Berdasarkan Tabel 2, konfigurasi 2 bilah menghasilkan thrust paling rendah, yaitu 7,15 N, sehingga kurang memadai untuk kebutuhan operasi ATSV. Konfigurasi 3 bilah menunjukkan performa paling seimbang dengan thrust 20,92 N dan indeks T/Q tertinggi sebesar 45,5, yang menandakan keseimbangan terbaik antara dorongan dan beban torsi. Sementara itu, konfigurasi 4 bilah menghasilkan thrust tertinggi sebesar 26,84 N, tetapi disertai peningkatan torsi menjadi 0,61 N·m. Konfigurasi 5 bilah menghasilkan thrust 25,95 N dengan torsi yang sama, sehingga penambahan bilah dari 4 menjadi 5 tidak memberikan peningkatan dorong yang signifikan. Dengan demikian, jumlah bilah yang lebih banyak tidak selalu menghasilkan performa yang lebih baik. Visualisasi pada Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13 memperkuat hasil tersebut, yaitu konfigurasi 3 bilah paling seimbang, sedangkan konfigurasi 4 bilah menghasilkan dorongan maksimum.



Gambar 11. Diagram batang perbandingan thrust rata-rata untuk 2, 3, 4, dan 5 bilah



Gambar 12. Diagram batang perbandingan torsi rata-rata untuk 2, 3, 4, dan 5 bilah



Gambar 13. Diagram batang perbandingan indeks T/Q untuk tiap konfigurasi bilah

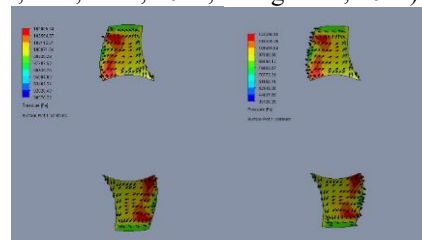
### 3.1.3 Struktur Aliran dan Distribusi Tekanan

Selain data numerik thrust dan torsi, hasil simulasi juga memberikan informasi mengenai struktur aliran dan distribusi tekanan pada masing-masing konfigurasi bilah. Ringkasan karakter aliran untuk setiap variasi jumlah bilah disajikan pada Tabel 3. Tabel ini digunakan untuk menunjukkan hubungan antara perubahan jumlah bilah dengan pola jet di hilir, pemerataan tekanan, dan implikasinya terhadap karakter dorong thruster.

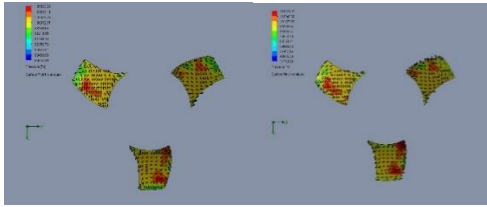
Tabel 3. Aliran dan implikasinya terhadap operasi ATSV

Jumlah bilah	Pola jet di hilir	Distribusi tekanan di bilah	Karakter aliran	Implikasi terhadap operasi ATSV
2 bilah	Jet sempit, hanya dua kuat	Perbedaan tekanan besar, beban per bilah tinggi	Aliran kurang merata	Dorongan rendah, kurang sesuai untuk operasi utama
3 bilah	Jet lebih penuh mengisi penampang duct	Tekanan lebih merata	Aliran cukup stabil	Sesuai untuk operasi lurus dengan karakter dorong seimbang
4 bilah	Jet paling homogen, seluruh penampang terisi	Tekanan cukup merata	Aliran paling penuh dan kuat	Sesuai untuk kebutuhan manuver
5 bilah	Jet merata tetapi disertai pusaran lebih banyak	Tekanan merata, tetapi interaksi antarbilah tinggi	Mulai muncul rugi-rugi aliran	Tidak menunjukkan keunggulan nyata 4 bilah

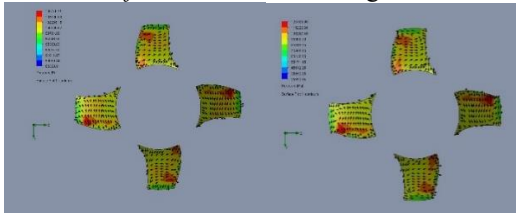
Interpretasi Tabel 3 menunjukkan bahwa kualitas dorong thruster dipengaruhi oleh struktur wake, homogenitas jet, dan rugi-rugi energi di hilir. Aliran yang lebih homogen cenderung menghasilkan transfer momentum aksial yang lebih baik, sedangkan wake dengan pusaran kuat dapat meningkatkan kehilangan energi dan menurunkan efektivitas dorong. Distribusi tekanan pada setiap konfigurasi bilah ditampilkan pada Gambar 14 sampai Gambar 17. Hasil visualisasi menunjukkan adanya perbedaan luas dan sebaran tekanan pada masing-masing jumlah bilah. Distribusi tekanan yang lebih merata menunjukkan beban hidrodinamika yang lebih stabil pada permukaan bilah.. (Hu, Wan, Yan, et al., 2024; Wang et al., 2024)



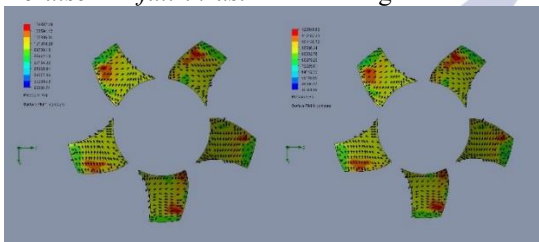
Gambar 14. Distribusi tekanan permukaan pada kondisi cruise dan full-thrust untuk konfigurasi 2 bilah



Gambar 15. Distribusi tekanan permukaan pada kondisi *cruise* dan *full-thrust* untuk konfigurasi 3 bilah

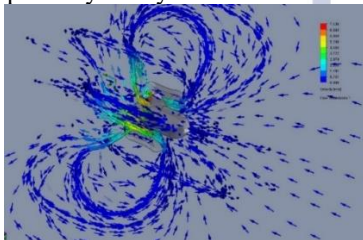


Gambar 16. Distribusi tekanan permukaan pada kondisi *cruise* dan *full-thrust* untuk konfigurasi 4 bilah

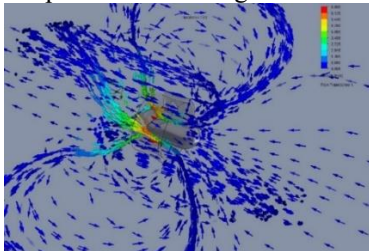


Gambar 17. Distribusi tekanan permukaan pada kondisi *cruise* dan *full-thrust* untuk konfigurasi 5 bilah

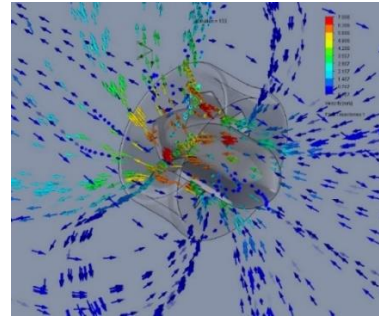
Selanjutnya, visualisasi kontur tekanan dan pola aliran di sekitar *thruster* ditunjukkan pada **Gambar 18** sampai **Gambar 21**. Keempat gambar tersebut memperlihatkan perubahan karakter jet dan aliran hilir pada setiap konfigurasi bilah. Hasil visual tersebut mendukung temuan bahwa konfigurasi **4 bilah** menghasilkan aliran paling homogen, sedangkan konfigurasi **3 bilah** menghasilkan aliran yang tetap stabil dengan beban putar yang lebih seimbang. Kajian tentang *wake structures* pada propulsor modern juga menunjukkan bahwa kualitas aliran hilir menjadi indikator penting dalam menjelaskan perbedaan performa yang tidak selalu tercermin sepenuhnya hanya dari nilai *thrust* statik.



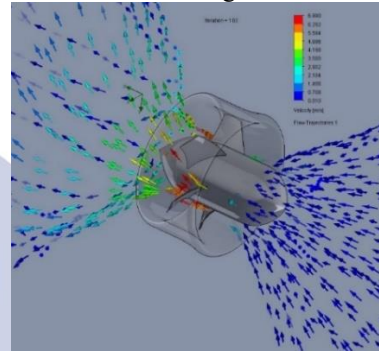
Gambar 18. Kontur tekanan permukaan dan 93ector kecepatan untuk konfigurasi 2 bilah



Gambar 19. Kontur tekanan permukaan dan 93ector kecepatan untuk konfigurasi 3 bilah



Gambar 20. Kontur tekanan permukaan dan lintasan aliran untuk konfigurasi 4 bilah



Gambar 21. Kontur tekanan permukaan dan lintasan aliran untuk konfigurasi 5 bilah

### 3.2 Pembahasan

#### 3.2.1 Pengaruh Jumlah Bilah terhadap Karakter Dorong

Untuk memperjelas hubungan antara variasi jumlah bilah dengan karakter dorong yang dihasilkan, hasil simulasi diinterpretasikan secara ringkas pada **Tabel 4**. Tabel ini digunakan untuk menghubungkan hasil numerik dan visual dengan implikasi operasional terhadap ATSV.

**Tabel 4. Ringkasan interpretasi pengaruh jumlah bilah terhadap karakter dorong**

Jumlah bilah	Hasil utama	Interpretasi	Implikasi terhadap ATSV
2 bilah	<i>Thrust</i> dan indeks T/Q paling rendah	Luas kerja bilah kecil, dorongan terbatas	Tidak sesuai untuk lintasan utama
3 bilah	<i>Thrust</i> meningkat besar, T/Q tertinggi	Dorongan dan beban putar paling seimbang	Cocok untuk lintasan lurus
4 bilah	<i>Thrust</i> tertinggi	Luas kerja bilah lebih besar, aliran paling penuh	Cocok untuk lintasan manuver
5 bilah	<i>Thrust</i> tidak bertambah signifikan	Penambahan bilah mulai mencapai titik jenuh	Kurang efektif dibanding 4 bilah

Berdasarkan **Tabel 4**, peningkatan jumlah bilah dari 2 menjadi 3 bilah menghasilkan lonjakan *thrust* yang sangat besar, yakni dari 7,15 N menjadi 20,92 N. Pada konfigurasi 4 bilah, *thrust* meningkat kembali menjadi 26,84 N. Akan tetapi, ketika jumlah bilah dinaikkan menjadi 5 bilah, nilai *thrust* tidak lagi meningkat, bahkan sedikit menurun menjadi 25,95 N. Kondisi ini menunjukkan bahwa terdapat **batas optimum dalam penambahan jumlah bilah**. Dengan kata lain, jumlah bilah yang lebih banyak tidak selalu menghasilkan peningkatan performa yang linear.

### 3.2.2 Kesesuaian Jumlah Bilah terhadap Lintasan Lurus

Pada lintasan lurus, kapal ATSV membutuhkan dorongan yang cukup, stabil, dan tidak membebani sistem penggerak secara berlebihan. Oleh karena itu, konfigurasi yang paling sesuai bukan sekadar yang memiliki *thrust* tertinggi, melainkan yang memberikan **keselimbangan terbaik antara *thrust* dan torsi**. Ringkasan penilaian terhadap lintasan lurus disajikan pada **Tabel 5**.

**Tabel 5. Kesesuaian jumlah bilah terhadap lintasan lurus**

Jumlah bilah	Karakter utama	Evaluasi untuk lintasan lurus	Rekomendasi
2 bilah	Dorongan rendah	Tidak cukup untuk operasi lurus yang stabil	Tidak direkomendasikan
3 bilah	Dorongan seimbang, T/Q tertinggi	Paling sesuai	Rekomendasi utama
4 bilah	Dorongan sangat tinggi, torsi lebih besar	Dapat digunakan, tetapi kurang seimbang	Alternatif
5 bilah	Dorongan tinggi tetapi tidak lebih baik dari 4 bilah	Kurang efisien untuk operasi lurus	Kurang direkomendasikan

Berdasarkan **Tabel 5**, konfigurasi **3 bilah** merupakan konfigurasi yang paling sesuai untuk lintasan lurus. Nilai indeks **T/Q** yang tertinggi menunjukkan bahwa konfigurasi ini memberikan dorongan yang memadai tanpa peningkatan beban putar yang terlalu besar. Dengan demikian, konfigurasi 3 bilah lebih sesuai untuk operasi jelajah di perairan danau yang menuntut **kestabilan gerak dan penggunaan daya yang proporsional**.

### 3.2.3 Kesesuaian Jumlah Bilah terhadap Lintasan Zig-Zag

Berbeda dengan lintasan lurus, **lintasan zig-zag** memerlukan cadangan dorong yang lebih besar karena kapal harus melakukan perubahan arah secara berulang. Pada kondisi ini, kemampuan menghasilkan *thrust* tinggi menjadi faktor yang lebih dominan. Ringkasan evaluasi terhadap lintasan zig-zag disajikan pada **Tabel 6**.

**Tabel 6. Kesesuaian jumlah bilah terhadap lintasan zig-zag**

Jumlah bilah	Keunggulan	Kelemahan	Evaluasi untuk lintasan zig-zag	Rekomendasi
2 bilah	Torsi kecil	<i>Thrust</i> terlalu rendah	Tidak sesuai	Tidak direkomendasikan
3 bilah	Dorongan cukup seimbang	Dorongan masih di bawah 4 bilah	Cukup sesuai	Alternatif
4 bilah	<i>Thrust</i> tertinggi, aliran homogen	Torsi lebih tinggi	Paling sesuai	Rekomendasi utama
5 bilah	Dorongan tinggi	Tidak lebih unggul dari 4 bilah	Kurang optimal	Kurang direkomendasikan

Berdasarkan **Tabel 6**, konfigurasi **4 bilah** merupakan konfigurasi yang paling sesuai untuk lintasan zig-zag

karena menghasilkan *thrust* tertinggi dan pola aliran paling homogen. Hasil visual pada **Gambar 16** dan **Gambar 20** juga menunjukkan bahwa konfigurasi ini menghasilkan distribusi aliran yang paling mendukung perubahan arah berulang. Oleh sebab itu, konfigurasi 4 bilah dinilai paling tepat untuk kondisi lintasan yang menuntut **manuver sedang hingga tinggi**.

### 3.2.4 Kesesuaian Jumlah Bilah terhadap Lintasan Putar Around

Pada lintasan **putar around**, kapal membutuhkan respons manuver yang lebih tajam dalam ruang gerak yang lebih sempit. Dalam kondisi ini, konfigurasi bilah yang dipilih harus mampu memberikan dorongan yang kuat dan tetap menghasilkan karakter aliran yang mendukung perubahan orientasi kapal. Ringkasan evaluasi terhadap lintasan putar *around* disajikan pada **Tabel 7**.

**Tabel 7. Kesesuaian jumlah bilah terhadap lintasan putar around**

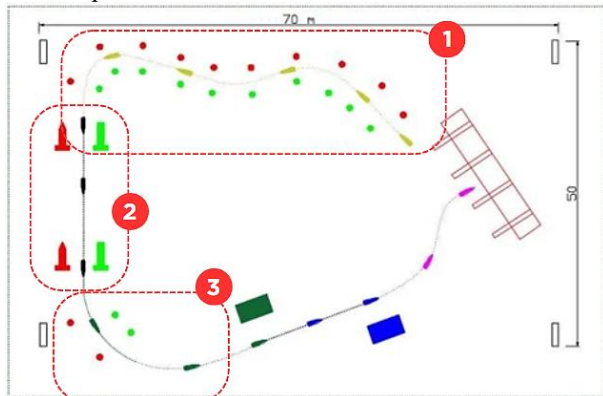
Jumlah bilah	Karakter utama	Evaluasi untuk putar around	Rekomendasi
2 bilah	Dorongan rendah dan kurang merata	Tidak sesuai untuk manuver tajam	Tidak direkomendasikan
3 bilah	Dorongan cukup baik	Masih di bawah 4 bilah untuk manuver	Alternatif terbatas
4 bilah	Dorongan paling besar dan aliran paling homogen	Paling sesuai	Rekomendasi utama
5 bilah	Dorongan tinggi tetapi tidak lebih efektif dari 4 bilah	Kurang unggul	Kurang direkomendasikan

Berdasarkan **Tabel 7**, konfigurasi **4 bilah** kembali menjadi pilihan yang paling sesuai untuk lintasan putar *around*. Meskipun konfigurasi **5 bilah** menghasilkan *thrust* yang mendekati 4 bilah, hasil visual menunjukkan bahwa konfigurasi 5 bilah cenderung menghasilkan **pusaran hilir** yang lebih besar. Dengan demikian, tambahan bilah tersebut tidak memberikan peningkatan dorong efektif yang cukup berarti. Oleh sebab itu, konfigurasi **4 bilah** tetap lebih unggul untuk kebutuhan manuver tajam. Dalam studi propeller dan manuver, kondisi perubahan orientasi yang tajam umumnya lebih sensitif terhadap **dorongan efektif dan kualitas aliran hilir** dibanding sekadar nilai *thrust* rata-rata statik. Oleh sebab itu, konfigurasi yang menghasilkan jet lebih homogen dan momentum aksial lebih kuat akan lebih menguntungkan untuk tugas manuver yang memerlukan reaksi cepat pada ruang terbatas.

### 3.2.5 Interpretasi Kesesuaian Jumlah Bilah Berdasarkan Denah Lintasan Misi ATSV

Untuk memperjelas hubungan antara hasil simulasi *thruster* dengan kebutuhan operasional kapal, pembahasan hasil tidak hanya ditinjau berdasarkan kategori lintasan secara umum, tetapi juga diinterpretasikan berdasarkan **denah lintasan misi prototipe kapal ATSV**. Pada **Gambar 22**, lintasan dibagi menjadi **tiga segmen utama**, yaitu **segmen 1** berupa lintasan jelajah lurus (*cruising*

straight), **segmen 2** berupa lintasan manuver sedang dengan pola zig-zag atau perubahan haluan, dan **segmen 3** berupa lintasan manuver tajam berupa putar *around* pada area sempit.



Gambar 22. Denah lintasan misi prototipe kapal *Autonomous Tourism Surface Vessel* (ATSV)

Berdasarkan hasil simulasi dan lintasan misi pada **Gambar 22**, setiap segmen ATSV memiliki **kebutuhan propulsi yang berbeda**. Pada **segmen 1** yang didominasi gerak lurus stabil, konfigurasi **3 bilah** menjadi pilihan paling sesuai karena menghasilkan **thrust 20,92 N** dengan **indeks T/Q tertinggi sebesar 45,5**. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi 3 bilah mampu memberikan **keseimbangan terbaik antara gaya dorong dan beban torsi**, sehingga cocok untuk menjaga kestabilan gerak kapal pada lintasan lurus.

Sementara itu, pada **segmen 2** yang berupa lintasan zig-zag dan **segmen 3** yang menuntut **manuver tajam**, konfigurasi **4 bilah** lebih direkomendasikan. Konfigurasi ini menghasilkan **thrust tertinggi sebesar 26,84 N** serta memiliki **pola aliran yang lebih homogen**, sehingga lebih efektif dalam mendukung **perubahan arah, akselerasi saat berbelok, dan manuver putar tajam**.

Konfigurasi **2 bilah** tidak direkomendasikan karena menghasilkan **thrust paling rendah, yaitu 7,15 N**, sehingga kurang memadai untuk lintasan lurus maupun manuver. Adapun konfigurasi **5 bilah** memang menghasilkan **thrust cukup tinggi sebesar 25,95 N**, tetapi peningkatannya **tidak signifikan dibandingkan 4 bilah** dan cenderung menimbulkan **interaksi aliran antarbilah yang lebih besar**.

Dengan demikian, pemilihan jumlah bilah thruster sebaiknya mempertimbangkan **karakter lintasan misi**. Konfigurasi **3 bilah lebih sesuai untuk operasi dominan lintasan lurus**, sedangkan konfigurasi **4 bilah lebih tepat untuk misi dengan kebutuhan manuver dan perubahan arah yang lebih intensif**.

### 3.2.6 Rekomendasi Akhir terhadap Lintasan Operasi ATSV

Sebagai ringkasan akhir pembahasan, hasil simulasi menunjukkan bahwa pemilihan jumlah bilah *thruster* T200 harus disesuaikan dengan jenis lintasan misi kapal. Ringkasan rekomendasi akhir terhadap lintasan operasi ATSV disajikan pada **Tabel 8**.

**Tabel 8. Rekomendasi akhir jumlah bilah terhadap lintasan operasi ATSV**

Jumlah bilah	Karakter hasil simulasi	Lintasan yang paling sesuai	Rekomendasi akhir
<b>2 bilah</b>	Thrust paling rendah	Tidak sesuai untuk lintasan utama	Tidak direkomendasikan
<b>3 bilah</b>	Dorongan paling seimbang, indeks T/Q tertinggi	<b>Lintasan lurus</b>	Rekomendasi utama untuk jelajah
<b>4 bilah</b>	Thrust tertinggi, aliran paling homogen	<b>Zig-zag dan putar around</b>	Rekomendasi utama untuk manuver
<b>5 bilah</b>	Tidak menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan 4 bilah	Tidak menjadi pilihan utama	Kurang direkomendasikan

Berdasarkan **Tabel 8** dan interpretasi denah lintasan pada **Gambar 22**, dapat ditegaskan bahwa konfigurasi **3 bilah** paling sesuai untuk **lintasan lurus** atau mode jelajah, sedangkan konfigurasi **4 bilah** paling sesuai untuk **lintasan zig-zag dan putar around** yang membutuhkan kemampuan manuver lebih tinggi. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan jumlah bilah *thruster* pada prototipe ATSV harus didasarkan pada **karakter lintasan operasi**, bukan hanya pada asumsi bahwa semakin banyak bilah akan selalu menghasilkan performa yang lebih baik.

### Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi, variasi jumlah bilah pada *thruster* T200 berpengaruh terhadap karakter dorong dan kecocoannya terhadap lintasan operasi kapal prototipe *Autonomous Tourism Surface Vessel* (ATSV). Konfigurasi 2 bilah menghasilkan *thrust* paling rendah sehingga tidak direkomendasikan untuk kebutuhan operasi utama ATSV. Konfigurasi 3 bilah memberikan keseimbangan terbaik antara *thrust* dan torsi, yang ditunjukkan oleh nilai indeks T/Q tertinggi, sehingga paling sesuai untuk lintasan lurus. Konfigurasi 4 bilah menghasilkan *thrust* tertinggi dan pola aliran paling homogen, sehingga paling sesuai untuk lintasan zig-zag dan putar *around* yang membutuhkan kemampuan manuver lebih tinggi. Sementara itu, konfigurasi 5 bilah tidak menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan konfigurasi 4 bilah, sehingga tidak menjadi pilihan utama. Dengan demikian, pemilihan jumlah bilah *thruster* T200 pada prototipe ATSV sebaiknya didasarkan pada kebutuhan lintasan operasi kapal, yaitu 3 bilah untuk lintasan lurus dan 4 bilah untuk lintasan manuver.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih kepada tim peneliti dan pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama proses penelitian. Tanpa bantuan dan kerjasama dari semua pihak, penelitian ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Cai, B., Xu, Q., Tian, B., Qiu, L., Chai, W., Qi, J., & He, L. (2024). Improvement of the efficiency for rim-driven thrusters through acceleration of gap flow. *Ocean Engineering*, 291, 116480. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.116480>
- Han, Z., Wu, D., Zhang, J., Huang, T., Han, Q. L., & Zhang, M. (2024). COLREGs-Adaptive trajectory planning and decision-making in maritime autonomous surface ships. *Ocean Engineering*, 312, 119308. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.119308>
- Hu, J., Wan, Q., Li, X., Zhang, W., Ning, X., & Duan, C. (2024). Propeller-rudder interaction under different rudder angle. *Ocean Engineering*, 306, 118104. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.118104>
- Hu, J., Wan, Q., Yan, Q., Li, X., Ning, X., & Sun, S. (2024). Numerical study on effects of geometric parameters influence on two-dimensional cycloidal propellers. *Ocean Engineering*, 309, 118289. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.118289>
- Irannezhad, M., Kjellberg, M., Bensow, R. E., & Eslamdoost, A. (2024). Experimental and numerical investigations of propeller open water characteristics in calm water and regular head waves. *Ocean Engineering*, 302, 117703. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.117703>
- Jin, Z., Wang, P., Dong, H., An, X., & Xia, H. (2023). Numerical prediction of ducted propeller performance based on a BEM-RANS coupling method. *Ocean Engineering*, 271, 113761. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.113761>
- Li, Q., Cao, Y., Li, B., Ingram, D. M., & Kiprakis, A. (2020). Numerical modelling and experimental testing of the hydrodynamic characteristics for an open-frame remotely operated vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/JMSE8090688>
- Li, S., Liu, C., Chu, X., Zheng, M., Wang, Z., & Kan, J. (2022). Ship maneuverability modeling and numerical prediction using CFD with body force propeller. *Ocean Engineering*, 264, 112454. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.112454>
- Liu, B., Vanierschot, M., & Buysschaert, F. (2023). Numerical study of scale effects on the open water performance of a rim-driven thruster. *Applied Ocean Research*, 138, 103667. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2023.103667>
- Liu, B., Yan, X., Ouyang, W., & Vanierschot, M. (2024). Comparison study of the vortical structures in the wake of a rim-driven thruster and a ducted propeller in bollard conditions. *Ocean Engineering*, 306, 118064. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.118064>
- Lovibond, O., Elbarghthi, A. F. A., Dvorak, V., & Wen, C. (2023). Numerical analysis of propellers for electric boats using computational fluid dynamics modelling. *Energy Conversion and Management: X*, 17, 100349. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2023.100349>
- Sinaga, N., Dhande, D. Y., & Yunianto, B. (2022). A numerical investigation of the effect of blade number on the performance of an INSEAN E779A marine propeller in a cavitating flow using computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*, 261, 112063. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.112063>
- Wang, C., Liu, S., Xia, K., Wang, C., & Ye, L. (2024). Numerical research on hydrodynamic performance of toroidal propeller under the influence of geometric parameters. *Ocean Engineering*, 314, 119704. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.119704>
- Wu, Z., Gong, J., Ding, J., Sun, Y., & Ma, C. (2023). Autonomous modification and optimization method for rim-driven system in surface ships. *Ocean Engineering*, 290, 116293. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.116293>
- Zhang, C., Dhyani, A., Ringsberg, J. W., Thies, F., Negenborn, R. R., & Reppa, V. (2025). Nonlinear model predictive control for path following of autonomous inland vessels in confined waterways. *Ocean Engineering*, 334, 121592. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2025.121592>
- Zhang, C., Zhang, C., Thies, F., Mao, W., & Ringsberg, J. W. (2025). A voyage planning framework for energy performance analysis of autonomous inland waterway vessels. *Energy*, 335, 137906. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.137906>