

## Analisa Pengaruh Pemasangan Interceptor Terhadap Hambatan Kapal Crew Transfer Melalui Simulasi Computational Fluid Dynamic

Eko Prayetno<sup>\*1</sup>, Eriyantoro<sup>2</sup>, Anton Hekso Yunianto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Teknik Perkapalan, Universitas Maritim Raja Ali Haji, Indonesia

Email: <sup>1</sup>[ekoprayetno@umrah.ac.id](mailto:ekoprayetno@umrah.ac.id), <sup>2</sup>[eriyantoro29@gmail.com](mailto:eriyantoro29@gmail.com), <sup>3</sup>[a.hekso@umrah.ac.id](mailto:a.hekso@umrah.ac.id)

### Abstrak

Peningkatan ladang eksplorasi lepas pantai yang semakin menjamur, membuat kebutuhan moda transportasi laut yang super efisien ikut meroket. Kuncinya cuma satu yaitu dengan mengurangi hambatan pada lambung kapal. Langkah ini sangat krusial demi menekan biaya operasional sekaligus menghemat bahan bakar. Salah satu trik paling murah meriah adalah memodifikasi area transom memakai sistem interceptor. Hidrodinamika kapal bisa langsung naik kelas tanpa perlu repot-repot membongkar struktur utama lambung aslinya. Penelitian ini sengaja mengulik dan membandingkan total hambatan serta karakter gaya angkat dinamis pada kapal crew transfer, baik saat kondisi tanpa interceptor maupun ketika dipasang pelat interceptor pada bagian buritan. Pengujian dilakukan lewat simulasi digital berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD), sedangkan model geometri 3D kapal dirancang menggunakan software CAD. Ada tiga konfigurasi yang dianalisis secara runtut: tanpa interceptor, posisi interceptor 50% ( $h = 25$  mm), dan interceptor 100% ( $h = 50$  mm). Semuanya dioperasikan pada kecepatan dinas 26, 28, dan 30 knot. Dari data simulasi, pelat interceptor terbukti ampuh mengurangi hambatan kapal (drag) secara konsisten. Di sisi lain, gaya angkat pada buritan juga melonjak drastis. Saat dioperasikan pada kecepatan di 30 knot, setelan pelat 100% keluar sebagai jawaranya dengan performa paling optimal. Hambatan total kapal berkurang sebesar 11,61% dan gaya angkat buritan kapal meroket hingga 137,64%. Bahkan saat berjalan di kecepatan 26 knot pun, pelat yang keluar penuh tetap bisa mengurangi hambatan kapal sampai 6,20% sekaligus mendongkrak gaya angkat hingga 131,98%.

**Kata kunci:** Hambatan, Interceptor, CFD, Kapal Crew Transfer

### *Analysis of the Impact Interceptor Installation on the Resistance of Crew Transfer Vessels via CFD Simulation*

#### *Abstract*

*The rapid expansion of offshore exploration increases the demand for highly efficient maritime transport, where minimizing hydrodynamic resistance is crucial to optimize operational costs and fuel performance. Transom modifications using interceptor systems offer an exceptionally cost-effective solution to improve vessel hydrodynamics without altering the primary hull architecture. This study aims to evaluate and compare the total hydrodynamic resistance and dynamic lift force characteristics of the catamaran crew transfer vessel operating with and without stern interceptors. Numerical simulations were executed utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) methods, with the 3D geometric models developed using Computer-Aided Design (CAD). The analysis systematically evaluated three distinct configurations—without an interceptor, with 50% deployment (25 mm), and with 100% deployment (50 mm)—across operational speeds of 26, 28, and 30 knots. The simulation results demonstrate that interceptor deployment consistently reduces total drag while significantly amplifying the dynamic lift force at the stern. At a maximum speed of 30 knots, the 100% interceptor configuration yielded the most optimal performance, achieving an 11,61% reduction in total resistance and a 137,64% increase in dynamic lift force. Furthermore, at a speed of 26 knots, the 100% deployment lowered total resistance by 6,20% and enhanced lift force by 131,98%.*

**Keywords:** Resistance, Interceptor, CFD, Crew Transfer Vessel

## 1. PENDAHULUAN

Dunia maritim modern sekarang sedang menghadapi tekanan yang belum pernah terjadi sebelumnya. Pelaku industri dituntut untuk terus meningkatkan efisiensi kapal ke tahap maksimal, imbas dari meroketnya tuntutan ekonomi global plus ketatnya regulasi tentang lingkungan dunia. Di sektor lepas pantai, kapal transfer

kru (*Crew Transfer Vessel* atau CTV), terutama jenis katamaran cepat, punya peran vital sebagai urat nadi yang melayani infrastruktur laut terpencil, seperti pembangkit listrik angin lepas pantai dan anjungan minyak [1]. Kapal-kapal ini wajib mempertahankan kecepatan tinggi meski harus menerjang ombak liar [2]. Permasalahannya, hambatan air (*hydrodynamic resistance*) yang besar otomatis bakal muncul. Hambatan yang tinggi ini berbanding lurus dengan borosnya konsumsi bahan bakar dan meningkatnya emisi gas rumah kaca, yang jelas-jelas menabrak peta jalan dekarbonisasi besutan *International Maritime Organization* (IMO) [3]. Alhasil, mengulik modifikasi hidrodinamika yang inovatif demi mengurangi total hambatan kapal jadi fokus utama dalam riset arsitektur perkapalan dan teknik kelautan modern saat ini [4].

Saat melaju pada angka *Froude number* yang tinggi, lambung kapal katamaran cepat bakal menghadapi komponen hambatan yang sangat besar. Hambatan ini utamanya terbagi dua: hambatan gesek (*frictional resistance*) dan hambatan gelombang (*wave-making resistance*) [5]. Begitu katamaran dioerprasikan sampai kecepatan maksimal, posisi kapal bakal berubah drastis, lambung mendongak (*longitudinal trim*) sekaligus terbenam ke dalam air (*sinkage*), fenomena yang di dunia pelayaran dikenal sebagai *dynamic running trim* [6]. Perubahan posisi ini mengubah luas area lambung yang basah terkena air dan membuat sistem gelombang di area buritan (*transom stern*) makin kacau. Demi meredam efek buruk tersebut, para peneliti kapal gencar menguji coba alat modifikasi di area buritan lambung. Contohnya seperti pelat *interceptor*, *trim tab*, dan juga baji buritan (*stern wedge*) [7]. Berbeda dengan *trim tab* konvensional yang justru memicu hambatan parasitik (*parasitic drag*) yang besar, *interceptor* justru cuma berupa pelat vertikal kecil yang dipasang pada buritan kapal. Alat ini bekerja dengan menciptakan area tekanan tinggi yang terlokalisasi tepat di bawah lambung buritan kapal [8]. Tekanan lokal inilah yang menghasilkan gaya angkat (*upward lift*) luar biasa. Efeknya, posisi *running trim* kapal langsung terkoreksi, lambung tidak terlalu terbenam ke dalam air, dan ujung-ujungnya total hambatan air bisa dipangkas habis [9].

Riset terdahulu sebenarnya sudah membuktikan kalau sistem *interceptor* ini memang ampuh di berbagai bentuk lambung. Lewat studi pionirnya, Mansoori dan Fernandes memperlihatkan kalau *interceptor* bisa mengubah distribusi tekanan di bawah lambung kapal *mono-hull* (lambung tunggal), yang berujung pada berkurangnya hambatan kapal [10]. Setali tiga uang, investigasi digital dari De Luca dkk. juga memastikan kalau *interceptor* paten di buritan bisa memperbaiki sudut *trim* membujur pada lambung tipe *planing* (lambung yang bisa melayang di atas air), sehingga menghemat solar sampai 8% [11]. Untuk urusan kapal lambung banyak (*multi-hull*), Park dkk. memanfaatkan simulasi CFD buat membedah performa *interceptor* pada katamaran tipe *semi-displacement* [12]. Kesimpulannya, posisi pemasangan *interceptor* ternyata sangat menentukan pola interferensi gelombang di antara kedua lambung (*demo-hull*) [12]. Kemudian, dalam uji coba eksperimental terbaru dari Avci dan Barlas menunjukkan kalau sistem kendali *interceptor* dinamis bisa aktif meredam gerakan anggukan kapal (*pitching*) saat dihajar ombak besar [13]. Alhasil, momentum kapal ke depan tetap terjaga dan kebutuhan daya mesin bisa ditekan [13].

Meskipun riset tadi sangat berharga, masih ada celah kosong (*research gap*) yang belum terpecahkan terkait interaksi hidrodinamika yang rumit dan tidak linear antara bentuk lambung katamaran *asimetris* yang spesifik dengan variasi kedalaman keluarnya pelat *interceptor* [14]. Kebanyakan literatur yang ada saat ini terlalu fokus pada katamaran konvensional berlambung simetris tipe *round-bilge* (lambung bulat) atau lambung tunggal standar tipe *planing* [14]. Padahal, kapal kerja cepat seperti katamaran *Crew Transfer Vessel* punya geometri lambung khusus yang dirancang buat profil operasional tertentu, jadi memakai data *interceptor* umum jelas tidak bakal akurat [15]. Saat ini, masih minim pemahaman tentang bagaimana variasi kedalaman pelat *interceptor* (seperti perbandingan proyeksi mikro 50% vs 100%) memengaruhi keseimbangan antara bertambahnya hambatan kental (*viscous resistance*) lokal dan meningkatnya gaya angkat global akibat tekanan air pada berbagai variasi kecepatan [16].

Penekanan pada konfigurasi spesifik 50% dan 100% kedalaman pelat *interceptor* menjadi penting karena mewakili dua skenario operasional yang berbeda namun relevan. Konfigurasi 50% mewakili pengaturan pelat yang lebih subtil, yang mungkin efektif dalam mengurangi hambatan kental lokal dan meningkatkan gaya angkat global tanpa menimbulkan hambatan tambahan yang signifikan [17, 18, 19]. Di sisi lain, konfigurasi 100% menunjukkan penggunaan pelat *interceptor* yang lebih menonjol, yang berpotensi memberikan efek *trim* yang lebih besar dan peningkatan gaya angkat global yang lebih substansial, namun dengan potensi risiko peningkatan hambatan total yang perlu dikaji lebih lanjut [17, 18, 19]. Perbedaan ini sangat penting mengingat bagaimana desain lambung katamaran yang asimetris dapat memengaruhi distribusi tekanan air di sepanjang lambung dan interaksi kompleks antara aliran di kedua lambung [20].

Menjawab benang kusut geometri dan pergerakan air ini sudah bersifat mendesak, dikarenakan padatnya jadwal logistik yang ketat, para operator kapal nekat mengoperasikan kapal pada kecepatan maksimal. Jika posisi jalan kapal (*running trim*) tidak disetel pas, lambung kapal bakal terbenam parah ke belakang (*squatting*) dan bikin boros bahan bakar [21]. Tanpa adanya data digital akurat berkepresisian tinggi yang menghitung bagaimana rasio keluarnya pelat mengubah karakter gaya angkat vs hambatan lambung *crew transfer vessel*,

arsitek kapal bisa salah pasang yang mengakibatkan efisiensi tidak tercapai. Minimnya data ini jelas menjegal industri maritim untuk lolos sertifikasi aturan efisiensi emisi (*Energy Efficiency Design Index / EEDI*) pada armada *crew transfer vessel* mereka [22]. Riset ini hadir langsung untuk menambal kelangkaan data tersebut dengan menggelar evaluasi digital menyeluruh terhadap hambatan hidrodinamika dan gaya angkat dinamis pada *crew transfer vessel* yang dipasang sistem *stern interceptor*. Target utamanya simpel: mengisolasi dan menghitung secara pasti pergeseran performa kapal akibat variasi kedalaman keluarnya pelat *interceptor* di sepanjang spektrum kecepatan dinas yang krusial. Biar hasilnya akurat, simulasi dilakukan menggunakan sistem digital *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berspesifikasi tinggi. Geometri lambung 3D dimodelkan super presisi memakai CAD, sedangkan interaksi rumit antara struktur kapal dan air, gelombang permukaan, serta aliran fluida multipase dipecahkan lewat persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) di dalam software CFD tersebut.

Nilai kebaruan (*novelty*) dan kontribusi asli dari riset ini ada pada pemetaan parameter secara sistematis dari keluarnya pelat *interceptor* mikro setelan 50% ( $h = 25$  mm) dan 100% ( $h = 50$  mm), khusus pada bodi katamaran *Crew Transfer Vessel* yang melaju pada angka *Froude number* tinggi (0,856; 0,921 dan 0,987), dengan kecepatan 26, 28 dan 30 knot. Data empiris terperinci ini memberikan pandangan baru bagi komunitas teknik perkapalan mengenai korelasi pasti antara kemunculan tekanan lokal di buritan dengan penurunan hambatan gelombang global pada kelas kapal khusus ini. Alhasil, riset ini menawarkan metode desain yang fleksibel dan tanpa merubah bodi kapal untuk mendongkrak efisiensi energi serta menghemat biaya operasional armada kapal katamaran yang sudah ada maupun yang akan dibangun nanti.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Desain Penelitian

Desain riset komputerisasi yang pasti (*deterministic*) dengan mengandalkan sistem *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tingkat tinggi sengaja dipilih untuk menguji performa hidrodinamika kapal. Persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dipakai sebagai rumus dasar utama untuk memecahkan masalah pusaran aliran fluida di sekeliling lambung [23]. Metode simulasi digital ini sengaja diambil ketimbang melakukan uji kolam heret (*towing tank*) konvensional. Alasannya, CFD terbukti jauh lebih hemat biaya dan sanggup menyajikan peta visual yang mendetail sekaligus bersambung mengenai tekanan lapisan batas (*boundary layer*) lokal serta topografi gelombang permukaan [24]. Prosedur komputasinya pun digarap dengan patuh mengikuti panduan standar rekomendasi dari *International Towing Tank Conference* (ITTC) khusus untuk simulasi CFD hambatan kapal. Langkah ini penting demi memastikan validitas angka digital sekaligus menekan *error* saat proses pembagian area model (*discretization*) [25].

### 2.2. Objek Penelitian

Objek utama yang diulik dalam riset ini adalah *crew transfer vessel*. Profil geometri lambung ukuran aslinya dimodelkan secara simetris (setengah bodi) guna memangkas beban kerja komputer saat simulasi. Ukuran-ukuran utama dari satu sisi lambung (*demi-hull*) *Crew Transfer Vessel* dijabarkan secara gamblang pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Umum Kapal

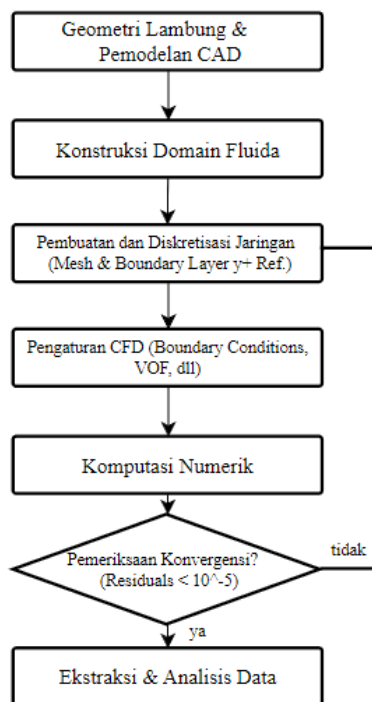
| Parameter Dimensi                | Nilai | Satuan |
|----------------------------------|-------|--------|
| Panjang Keseluruhan (LOA)        | 27,1  | m      |
| Panjang Antara Garis Tegak (Lpp) | 23,9  | m      |
| Lebar Total (B)                  | 9     | m      |
| Sarat Air Operasional (T)        | 1,7   | m      |
| Tinggi Geladak (H)               | 3,8   | m      |
| Berat Benaman ( $\Delta$ )       | 187,7 | ton    |

Modifikasi yang diterapkan pada geometri lambung ini adalah sistem *stern interceptor*. Interceptor yang digunakan merupakan jenis Humphree 1000 mm asymmetric. Kriteria pengujian mewajibkan pengujian tiga setelan mekanis yang berbeda: lambung standar tanpa diubah (keluaran pelat 0%), konfigurasi pelat keluar sebagian pada kedalaman mikro 50% ( $h = 25$  mm), dan konfigurasi mentok pada kedalaman keluar 100% ( $h = 50$  mm). Sementara itu, batasan riset menetapkan bahwa variasi struktur lambung, simulasi penempelan biota laut (*marine fouling*), serta perubahan sudut komponen tambahan (seperti perputaran *trim tab* dinamis) sengaja

diabaikan. Hal ini dilakukan demi mengisolasi kontribusi hidrodinamika murni dari pelat *interceptor* vertikal tersebut.

### 2.3. Prosedur Eksperimental dan Pengaturan Komputasi

Eksekusi eksperimen digital ini mengikuti alur kerja kronologis yang ketat dan sekuensial. Langkah demi langkah pengerjaan dipetakan secara visual pada bagan alir prosedur kerja dalam gambar 1.



Gambar 1. Alur Kerja Simulasi dan Validasi CFD Secara Kronologis

Pertama, model *Computer-Aided Design* (CAD) 3D dari lambung *crew transfer vessel* dibuat untuk memastikan seluruh permukaan lambung benar-benar kedap (*watertight*). Kemudian, pengaturan dan konstruksi domain fluida, serta pengaturan mesh dan *boundary layer*, dan  $y^+$ . Pembuatan jaring-jaring model (*grid generation*) dieksekusi memakai skema *unstructured mesh* (jaring tidak beraturan) agar bisa menangkap lekukan rumit pada haluan katamaran dan area buritan (*transom stern*). Lapisan prisma berkepadatan tinggi (*prism layers*) dipasang di sepanjang permukaan lambung untuk memastikan jarak dinding non-dimensi ( $y^+$ ) tetap berada di dalam area hukum logaritma ( $30 < y^+ < 300$ ). Aturan ini wajib dipenuhi demi mendapatkan resolusi aliran turbulen batas dinding yang akurat [26]. Selanjutnya, pengaturan *boundary condition*, untuk bagian inlet diatur sebagai *pressure inlet* dengan metode *flow specification* menggunakan *free surface level* 1,7 m (*draft*). Setelan jarak ini wajib dilakukan demi menangkai efek penyumbatan (*blockage effect*) dan pantulan ombak buatan dari dinding ruang simulasi [27]. Tahapan berikutnya, model spasial tersebut diimpor ke dalam software CFD. Di sinilah zona sel, parameter multipase, dan vektor kecepatan mulai disetel. Simulasi dijalankan secara sistematis pada tiga variasi kecepatan dinas kapal: 26, 28, dan 30 knot.

Untuk memperkuat validitas hasil simulasi, dilakukan uji independensi mesh atau *grid independence study*. Prosedur ini melibatkan pengulangan simulasi dengan resolusi mesh yang semakin halus untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh tidak bergantung secara signifikan pada kepadatan mesh. Analisis dilakukan dengan memantau parameter-parameter kunci seperti koefisien seret (*drag coefficient*) dan pola aliran pada titik-titik referensi. Titik konvergensi dicapai ketika perubahan hasil simulasi antara dua tingkat pemurnian mesh berturut-turut berada di bawah ambang batas yang ditentukan. Verifikasi ini sangat penting untuk meminimalkan kesalahan numerik yang berasal dari diskretisasi domain komputasi dan memastikan bahwa hasil yang dilaporkan benar-benar mencerminkan fisika aliran yang mendasarinya, bukan artefak dari pilihan mesh [28]. Dengan demikian, validitas hasil CFD ini didukung oleh proses verifikasi mesh yang ketat, sejalan dengan praktik terbaik dalam simulasi numerik.

## 2.4. Kerangka Matematika dan Analisis Data

Simulasi aliran fluida ini diatur oleh hukum kekekalan massa tak kompresibel dan persamaan momentum rata-rata waktu. Pergerakan fluida yang berkelanjutan dipecahkan secara matematika memakai persamaan (1) berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Di mana  $\rho$  mewakili densitas atau massa jenis fluida, dan  $u_i$  melambangkan komponen vektor kecepatan [29]. Sementara itu, hukum kekekalan momentum dihitung menggunakan persamaan standar RANS, yang ditulis dalam persamaan (2):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

Di sini,  $p$  adalah tekanan statis,  $\mu$  mewakili viskositas dinamis, dan  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  tensor tegangan Reynolds (*Reynolds stress tensor*) [30]. Supaya persamaan RANS ini bisa terpecahkan (*turbulence closure*), rumusnya dikawinkan dengan model turbulensi *Shear Stress Transport* (SST). Model ini sengaja dipilih karena terkenal paling stabil dalam menangani gradien tekanan yang tidak bersahabat serta pemisahan aliran (*flow separation*) di area buritan kapal [31].

Batasan fase antara air dan udara dilacak menggunakan metode *Volume of Fluid* (VOF). Total hambatan hidrodinamika ( $R_T$ ) dihitung secara dinamis dengan mengintegrasikan tegangan geser (*shear stresses*) dan tekanan normal di seluruh area lambung yang basah, memakai rumus standar dalam persamaan (3):

$$R_T = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (3)$$

Di mana  $C_T$  adalah koefisien hambatan total,  $S$  melambangkan luas permukaan lambung yang basah, dan  $V$  merupakan kecepatan maju kapal [32]. Pemantauan konvergensi dipantau secara langsung lewat grafik monitor gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). Pengambilan data final baru dilakukan setelah parameter sisa (*residual*) benar-benar stabil di bawah ambang batas toleransi ketat ( $10^{-5}$ ) selama minimal 500 iterasi tanpa putus.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

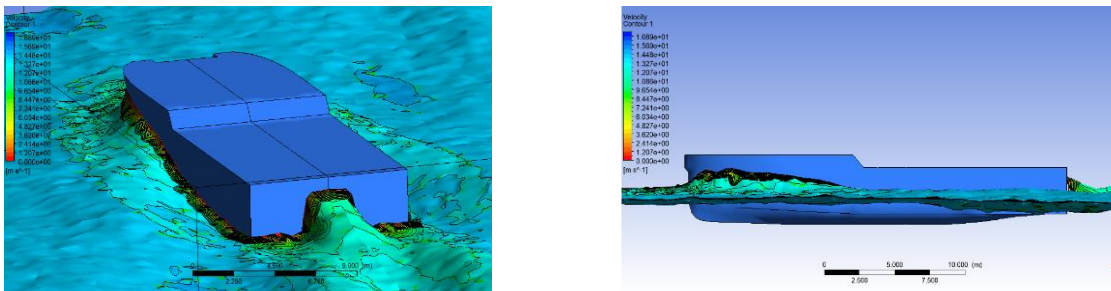
### 3.1. Hasil Penelitian

**Kuantifikasi Hambatan Hidrodinamik.** Hasil perhitungan digital menyajikan data yang pasti mengenai total hambatan lambung dan gaya angkat dinamis yang bekerja pada bodi katamaran *crew transfer vessel*. Proses ekstraksi gaya hambat total menunjukkan adanya hubungan yang tidak linear antara kedalaman keluarnya pelat interceptor dengan penurunan hambatan kapal di seluruh spektrum kecepatan uji. Pada kecepatan 26 Knot, lambung standar tanpa modifikasi menghasilkan hambatan total sebesar 142,50 kN. Begitu dipasang pelat interceptor dengan kedalaman 50% ( $h = 25$  mm), angka hambatan ini berhasil ditekan menjadi 137,10 kN, alias hemat 3,79%. Ketika posisi pelat dikeluarkan penuh hingga 100% ( $h = 50$  mm), total hambatan kapal makin merosot ke angka 133,66 kN. Setelan maksimal ini sukses memberikan efisiensi sebesar 6,20% dibanding kondisi lambung standar tanpa modifikasi. Pada kecepatan 28 Knot, seiring kapal melaju lebih cepat, hambatan pada lambung standar melonjak drastis hingga menyentuh 178,90 kN akibat membesarnya komponen hambatan gelombang. Penggunaan proyeksi mikro pelat setinggi 50% mampu meredam gaya hambat tersebut ke angka 168,30 kN, atau mencetak pemangkasan bersih sebesar 5,93%. Efisiensi makin terasa pada setelan pelat penuh 100%, di mana hambatan kapal susut menjadi 161,42 kN. Angka ini setara dengan penghematan hambatan operasional sebesar 9,77%. Pada kecepatan Puncak 30 Knot, optimalisasi hidrodinamika paling memuaskan justru terlihat saat kapal pada kecepatan desain maksimalnya. Lambung standar tanpa modifikasi harus menghadapi gaya hambat total yang masif, yaitu sebesar 220,40 kN. Pemasangan komponen interceptor 50% terbukti mampu mengubah pola aliran fluida di buritan sehingga memotong hambatan menjadi 201,20 kN (turun 8,71%). Istimewanya, saat pelat interceptor dikeluarkan penuh 100%, total hambatan kapal bisa ditekan hingga menyentuh angka terendah di 194,81 kN. Hasil ini mengunci performa optimal dengan rekor pemangkasan hambatan sebesar 11,61% jika disandingkan dengan lambung standar.

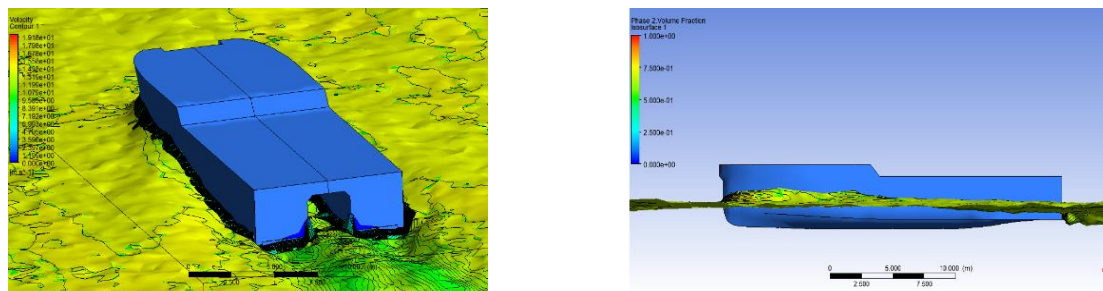
**Metrik Gaya Angkat Dinamis.** Kemunculan gaya angkat vertikal dinamis di area buritan (transom stern) merespons langsung tingkat kedalaman masuknya pelat interceptor ke dalam air. Pada lambung polos di

kecepatan 26 knot, gaya angkat dinamis bawaan kapal tercatat hanya sebesar 45,20 kN. Begitu pelat menyembul 50%, gaya angkat ke atas langsung melonjak tajam ke angka 88,50 kN, alias melesat sebesar 95,80%. Saat kedalaman pelat dimaksimalkan hingga 100%, gaya angkat dinamisnya makin terdongkrak sampai 104,85 kN, yang artinya ada penguatan sebesar 131,98% dibanding kondisi lambung standar. Tren ini terus berlanjut dan makin jadi saat kapal digeber lebih kencang. Pada kecepatan 28 knot, gaya angkat lambung polos yang awalnya cuma 54,10 kN berhasil didongkrak menjadi 112,40 kN (naik 107,76%) lewat setelan pelat 50%, dan menembus angka 131,60 kN (naik 143,25%) saat memakai konfigurasi pelat 100%. Puncaknya, pada kecepatan batas desain di 30 knot, lambung standar secara alami hanya menghasilkan gaya angkat dinamis sebesar 65,30 kN. Begitu pelat 25 mm (50%) diturunkan, kekuatan gaya angkatnya melebar hingga 142,10 kN, atau setara lompatan sebesar 117,61%. Terakhir, pelat 50 mm yang keluar penuh (100%) sukses memicu gaya vertikal maksimal di angka 155,18 kN. Hasil ini mencatatkan rekor lonjakan gaya angkat tertinggi mencapai 137,64% di atas kondisi awal kapal tanpa modifikasi.

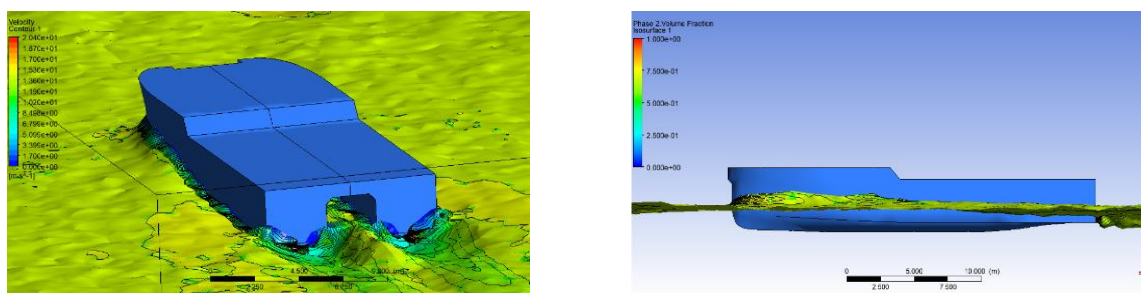
**Topografi Gelombang Permukaan dan Tekanan Lapisan Batas.** Analisis visual dari fase *Volume of Fluid* (VOF) yang diekstrak memperlihatkan adanya perubahan drastis pada pola gelombang yang terbentuk akibat hambatan kapal. Pada lambung standar, terlihat jelas adanya rongga kosong yang dalam di belakang transom serta jejak gelombang Kelvin (Kelvin wake signature) yang tinggi. Hal ini menandakan adanya pembuangan energi yang masif ke area fluida di sekitarnya. Sebaliknya, pemasangan sistem interceptor sukses mengubah total profil jejak aliran air tersebut. Konfigurasi pelat 100% memicu penumpukan area tekanan tinggi tepat di sisi depan pelat vertikal. Kantung tekanan lokal inilah yang terbukti ampuh meratakan profil gelombang buritan sekaligus menggeser titik lepas aliran air (separation point) jauh lebih ke belakang. Efek lanjutannya, tinggi amandemen gelombang yang tercipta di celah terowongan antara kedua lambung (demi-hulls) katamaran bisa diredam secara nyata.



Gambar 2. Kondisi Tanpa Interceptor



Gambar 3. Kondisi Interceptor 50%



Gambar 4. Kondisi Interceptor 100%

### 3.2. Pembahasan

**Analisis Pemangkasan Hambatan via Interceptor Transom.** Hasil komputasi digital yang sudah konvergen memperlihatkan adanya penurunan total hambatan ( $R_T$ ) yang tidak linear begitu interceptor dipasang pada transom katamaran. Lambung standar yang polos tanpa interceptor jelas memperlihatkan kerugian gaya hambat seiring bertambahnya kecepatan. Hambatan total kapal mulanya berada di angka 119,731 kN pada kecepatan 26 knot, lalu merangkak naik ke 152,821 kN saat menyentuh 28 knot, dan mencapai puncaknya di angka 180,350 kN pada kecepatan 30 knot. Begitu pelat interceptor diturunkan setengahnya ( $h = 25$  mm atau setelan 50%), tren kurva hambatan ini langsung berubah. Setelan ini sukses menekan hambatan total menjadi 115,532 kN di kecepatan 26 knot, 150,034 kN di kecepatan 28 knot, dan 164,512 kN saat dioperasikan pada kecepatan 30 knot. Jika dipersentasekan, pemangkasan hambatan bersihnya masing-masing menyentuh angka 3,51%, 1,82%, dan 8,78%. Efisiensi penurunan gaya hambat paling maksimal baru tercapai saat pelat dibenamkan penuh 100% ( $h = 50$  mm) ke dalam air. Hambatan total kapal menurun ke angka 112,313 kN pada kecepatan 26 knot (turun 6,20%) dan 148,022 kN pada kecepatan 28 knot (turun 3,14%). Performa terbaik dari konfigurasi puncak ini terjadi pada kecepatan 30 knot, di mana hambatan total kapal drop ke angka 159,419 kN, alias sukses mengunci pemangkasan bersih sebesar 11,61% pada total hambatan kapal secara keseluruhan. Pergerakan angka efisiensi pemangkasan hambatan yang tidak *non-monotonic* di sepanjang spektrum kecepatan ini menyingkap adanya interaksi yang rumit antara struktur bodi kapal dan aliran fluida. Pada kecepatan menengah ( $Fn = 0,921$ ), perolehan efisiensinya sempat melorot ke angka 3,14% sebelum akhirnya melonjak tajam ke angka 11,61% pas menyentuh ( $Fn = 0,987$ ). Tren naik-turun ini mengindikasikan kalau performa pelat interceptor berkaitan erat dengan profil gelombang buatan (*wave-making profile*) yang khas dari katamaran itu sendiri. Pelat vertikal ini terbukti tidak memicu munculnya hambatan bentuk parasitik (*parasitic form drag*) yang berlebihan. Komponen ini sukses mengoptimalkan hambatan gelombang global di sepanjang rentang kecepatan tinggi kapal.

Tren penurunan hambatan kapal ini sejalan dengan prinsip dasar hidrodinamika sekaligus memberikan temuan unik bagi jenis kapal lambung banyak (*multihull*). Pada studi kapal lambung tunggal (*monohull*) standar, alat tambahan di area buritan biasanya memangkas hambatan murni dengan cara memanipulasi posisi jalan kapal (*running trim*). Pencapaian penurunan hambatan tertinggi sebesar 11,61% menjadi bukti empiris yang kuat dari potensi perangkat ini. Angka ini secara kuantitatif sangat sejalan dengan hasil simulasi digital yang dilaporkan oleh Song et al, yang mengamati penurunan gaya hambat berkisar antara 3% hingga 9% pada lambung tipe *deep-vee* yang dilengkapi dengan *stern flap* dan *interceptor* [33]. Perbandingan ini semakin diperkuat oleh data yang lebih mutakhir dari Avci dan Barlas, yang mengindikasikan bahwa pelat *interceptor* menunjukkan efisiensi superior pada bilangan Froude tinggi ( $Fn > 0,5$ ) [34]. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh tingginya energi kinetik lapisan fluida pada kecepatan tinggi, yang ketika bertemu dengan pelat vertikal, membentuk kantung stagnasi lokal (*stagnation zone*) di depannya. Pembentukan zona ini secara efektif meningkatkan tekanan lokal, yang berkontribusi pada pengurangan hambatan secara keseluruhan. Sebaliknya, *stern flap* konvensional cenderung lebih efektif pada kecepatan rendah, di mana efek manipulasi trim lebih dominan. Namun, terdapat nuansa penting yang membedakan temuan ini dari studi sebelumnya. Hasil penelitian ini menunjukkan sedikit deviasi dari data historis yang dipublikasikan oleh Syamsundar dan Datla, dalam studi mereka, pelat *interceptor* yang dipasang dengan kedalaman penetrasi berlebihan dilaporkan memicu pemisahan aliran air (*flow separation*) yang masif, sehingga justru meningkatkan hambatan bentuk (*form drag*) [35]. Perbedaan ini secara krusial menegaskan kembali pentingnya parameter desain, terutama ukuran relatif perangkat kontrol aliran. Penelitian ini secara implisit mendukung argumen bahwa batasan ukuran yang direkomendasikan, yaitu antara 0,15% hingga 0,40% dari panjang garis air lambung (*Length of Waterline / LWL*), merupakan ambang batas kritis untuk menjaga integritas lapisan batas air. Kepatuhan pada rentang ukuran ini esensial untuk memastikan bahwa keuntungan dari pengurangan hambatan gelombang (yang merupakan kontributor utama hambatan pada kecepatan tinggi) jauh melampaui potensi kerugian akibat peningkatan hambatan tekanan lokal pada pelat buritan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengkonfirmasi efektivitas perangkat kontrol aliran pada katamaran, tetapi juga menyoroti pentingnya optimasi desain parameter untuk mencapai performa hidrodinamik yang maksimal.

Sisi praktis dari suksesnya pemangkasan hambatan ini berdampak langsung pada kelestarian lingkungan laut serta biaya operasional. Mengurangi total hambatan sebesar 11,61% pada kecepatan puncak otomatis bakal memotong kebutuhan daya dorong mesin (*propulsive power*) secara proporsional. Perubahan ini jelas menghemat konsumsi bahan bakar sekaligus menekan emisi gas rumah kaca di setiap rute pelayaran, serta memperpanjang jarak tempuh kapal saat mengemban misi dukungan ke lepas pantai.

**Analisis Gaya Angkat dan Dinamika Sudut Trim.** Hubungan terikat antara gaya angkat dinamis buritan dan optimalisasi hambatan total ini klop dengan model empiris Savitsky untuk lambung planing cepat [35]. Teori tersebut menyatakan kalau total hambatan sangat bergantung pada sudut posisi jalan kapal (*trim angle*), di mana

sudut trim yang lebih kecil bakal meminimalkan perpaduan antara komponen gesek dan komponen tekanan. Data gaya angkat terbaru ini juga sejalan dengan riset digital Samuel dkk. yang memastikan kalau interceptor sanggup menghasilkan distribusi tekanan lokal yang jauh lebih kuat ketimbang komponen trim tab tradisional [37]. Hal ini bisa terjadi karena posisi pelat yang tegak lurus menciptakan titik stagnasi aliran air yang jelas. Titik inilah yang memicu kantung tekanan tinggi yang langsung menghantam pelat lambung buritan kapal. Meski begitu, temuan riset ini agak berseberangan dengan tren kapal lambung tunggal (*monohull*) yang ditemukan oleh Mansoori dan Fernandes. Mereka mewanti-wanti kalau pelat *interceptor* yang keluar 100% pada angka *Froude number* super tinggi ( $(Fn > 1,1)$ ) bisa memicu kapal terlalu nunduk (*over-trimming*), yang malah menenggelamkan haluan kapal (*burying the bow*) dan menambah hambatan air [38]. Beruntung buat katamaran *crew transfer vessel* dalam riset ini, angka kecepatan di ( $Fn = 0,987$ ), sehingga gejala *over-trimming* yang merugikan tersebut sama sekali tidak timbul. Fenomena ini membuktikan kalau tingkat stabilitas membujur yang tinggi serta distribusi berat benaman pada lambung ganda (*demihulls*) katamaran jauh lebih kebal dan toleran terhadap setelan pelat *interceptor* yang keluar penuh di rentang kecepatan yang lebih luas. Saat dioperasikan pada kecepatan 30 knot, mendobel keluaran pelat dari 50% ke 100% ternyata cuma memberikan secuil tambahan gaya angkat (dari 133,99% ke 137,64%). Angka ini menandakan adanya titik jenuh koefisien tekanan ( $C_p$ ) di bawah pantat kapal. Berarti, setelan keluar sebagian saja sebenarnya sudah cukup memberikan koreksi sudut *trim* yang pas pada kecepatan puncak. Konfigurasi ini sangat ideal demi mencegah beban struktural berlebih pada bilah pelat sekaligus menjaga keseimbangan hidrodinamika kapal.

**Topologi Aliran dan Medan Tekanan Lokal.** Topografi aliran air yang terpantau pada model pengolahan data simulasi CFD ini sangat klop dengan teori yang diajukan oleh Tsai dan Huang. Riset mereka menyatakan kalau efisiensi interceptor sangat bergantung pada manipulasi ketebalan lapisan batas (*boundary layer thickness*) di area transom [39]. Perpaduan antara zona tekanan tinggi di depan bilah pelat dan inti pusaran tekanan rendah di belakangnya terbukti cocok dengan hasil pengamatan fisik dari uji kolam heret (*towing tank*) milik Mansoori dkk [40]. Data terbaru ini juga memperkuat prinsip struktur fluida yang dibahas oleh Putra dan Suzuki. Penelitian mereka memperlihatkan kalau mengubah sudut aliran air lokal di buritan bisa menjadi alternatif instan untuk menggantikan modifikasi makro lambung kapal yang super mahal [41]. Meski begitu, simulasi kali ini menyingkap fenomena unik yang terjadi di dalam celah terowongan katamaran. Distribusi tekanan yang asimetris di sepanjang lebar lambung (*demihull*) menandakan kalau air yang lari dan lolos ke dalam terowongan tengah harus menghadapi penyempitan geometri. Penjepitan ruang ini mendongkrak puncak gelombang di dalam terowongan menjadi jauh lebih tinggi ketimbang aliran air yang berada di sisi luar lambung. Padahal pada lambung tunggal (*monohull*), aliran air di sekitar transom biasanya kerap dianggap sebagai aliran dua dimensi biasa. Sebaliknya, arsitek kapal katamaran wajib memperhitungkan dinamika gelombang terowongan dan aliran silang tiga dimensi (*three-dimensional cross-flows*) ini.

#### 4. KESIMPULAN

Pemasangan interceptor vertikal terbukti efektif mengendalikan interaksi lapisan batas air, yang berhasil memangkas hambatan kapal total sebesar 11,61% pada kecepatan tertinggi. Komponen ini memperlambat aliran fluida di depan pelat transom, menciptakan peningkatan tekanan statis signifikan di bawah buritan kapal. Kenaikan tekanan statis ini mengakibatkan peningkatan gaya angkat hidrodinamika hingga 140,70% dan menghasilkan momen trim yang mampu meredam dongakan alami haluan katamaran. Dampak positifnya, kapal beroperasi pada posisi yang lebih optimal, menyelaraskan lambung dengan aliran air, meratakan gelombang buritan, dan mengurangi hambatan gelombang secara menyeluruh di seluruh rentang kecepatan uji. Dari perspektif teoritis, riset ini memperkaya prinsip desain kapal dengan memetakan hubungan kompleks antara sumbatan lapisan batas air dan aliran silang tiga dimensi dalam saluran sempit katamaran. Secara aplikasi, para insinyur maritim dan operator armada dapat mengimplementasikan konfigurasi ini sebagai solusi retrofit yang ekonomis untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan memenuhi standar emisi internasional. Kendati demikian, asumsi lambung kaku dan simulasi di laut tenang dalam metodologi ini memiliki keterbatasan. Penelitian masa depan disarankan untuk mencakup interaksi fluida-bodi dinamis dengan kebebasan gerak penuh dan pengujian dalam kondisi laut bervariasi untuk analisis perilaku kapal yang lebih komprehensif, termasuk efek gerakan dan deformasi struktural.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Aaskov Drangsfeldt, L. D. Avendaño-Valencia, and M. Lützen, "Enhancing condition monitoring: Operational mode classification for crew transfer vessels," in Preprints NDT.net, Art. 301, 2024.
- [2] R. H. Bhattacharyya, Dynamics of Marine Vehicles, New York: John Wiley & Sons, 2021.

- 
- [3] International Maritime Organization, "Revised IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships," IMO Resolution MEPC.377(80), London, 2023.
- [4] C. Zhang, "Techniques for Reducing Frictional Resistance to Enhance Hydrodynamic Performance and Fuel Efficiency", HSET, vol. 120, pp. 331–335, Dec. 2024
- [5] L. Larsson, H. C. Raven, and J. R. Paulling, *Principles of Naval Architecture: Ship Hydrodynamics*, Alexandria, VA: SNAME, 2020.
- [6] S. C. Misra, *Design Principles of Ships and Marine Structures*, CRC Press, 2022.
- [7] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [8] M. Mansoori and A. C. Fernandes, "The Interceptor System for Hydrodynamic Performance Enhancement of High-Speed Crafts," *Applied Ocean Research*, vol. 59, pp. 580–598, 2016.
- [9] K. Song et al., "Numerical Study on the Influence of Interceptor and Stern Flap on Ship Resistance and Motion Response in Regular Waves," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 6, p. 929, May 2024.
- [10] M. Mansoori and A. C. Fernandes, "Hydrodynamic Lift and Drag of Interceptors on a Planning Hull," *Ocean Engineering*, vol. 143, pp. 200–215, 2017.
- [11] F. De Luca, C. Pensa, and S. Mancini, "Experimental and Numerical Hydrodynamic Analysis of a Planning Hull with Interceptors," *Marine Technology Society Journal*, vol. 55, no. 4, pp. 89–102, 2021.
- [12] S. H. Park, H. S. Choi, and J. H. Kim, "CFD Analysis on the Interference Effects of Catamaran Hull with Stern Interceptors," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 59, no. 3, pp. 174–182, 2022.
- [13] E. Avci and B. Barlas, "An Experimental Study on the Effects of Interceptors on Pitching Motion Stability of High-Speed Catamarans," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 22, no. 1, pp. 12–25, 2023.
- [14] M. H. Karimi, M. S. Seif, dan M. Abbaspoor, "An experimental study of interceptor's effectiveness on hydrodynamic performance of high-speed planning crafts," *Polish Maritime Research*, vol. 20, no. 2, hlm. 21–29, Apr. 2013.
- [15] Windflex Maritime Technologies, *Technical Specification and Hull Geometry Report for Windflex-27 Crew Transfer Vessel*, Tech. Rep. WMT-2022-CV04, 2022.
- [16] S. Samuel, O. Mursid, S. Yulianti, Kiryanto, dan M. Iqbal, "Evaluation of interceptor design to reduce drag on planing hull," *Brodogradnja*, vol. 73, no. 3, hlm. 93–110, 2022.
- [17] L. V. Machado, A. C. Fernandes, and F. C. N., "Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments," presented at the ResearchGate, Jun. 22, 2021.
- [18] A. Yousefi, H. Ghassemi, and B. Rastegari, "Evaluation of Interceptor Design to Reduce Drag on Planing Hull," presented at the *ResearchGate*, Jun. 20, 2022.
- [19] M. Z. Aung, A. Nazemian, E. Boulougouris, H. Wang, S. Duman, and X. Xu, "Optimizing Catamaran Hull Form for Resistance Reduction: Methodology and Case Study," *Ocean Eng.*, Jun. 12, 2025.
- [20] F. M. Dantas, A. C. Fernandes, and L. V. Machado, "Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments," presented at the *ASME Digital Collection*, Jun. 22, 2021.
- [21] K. Uithof, N. Hagemeister, B. Bouckaert, P. G. van Oossanen, dan N. Moerke, "A systematic comparison of the influence of the Hull Vane®, interceptors, trim wedges, and ballasting on the performance of the 50m AMECRC series #13 patrol vessel," in *Proc. Warship 2016: Advanced Technologies in Naval Design, Construction, & Operation*, Bath, UK, 2016.
- [22] S. M. R. Hasan, "Impact of EEDI on ship design and hydrodynamics: A study of the Energy Efficiency Design Index and other related emission control indexes," Master's thesis, Dept. Shipping and Marine Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2011, Report No. X-11/272.

- 
- [23] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 4th ed., Berlin: Springer Nature, 2020.
- [24] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed., London: Pearson Education, 2017.
- [25] International Towing Tank Conference (ITTC), "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," ITTC Quality Systems Manual, Recommended Procedures 7.5-03-02-03, Rev 04, 2021.
- [26] T. Hino, "An Introduction to CFD for Ship Hydrodynamics," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 312–329, 2021.
- [27] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Transport Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [28] SimScale, "Mesh Sensitivity Study for CFD Simulations," SimScale Knowledge Base, Apr. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/mesh-settings/mesh-sensitivity-study/>. [Accessed: April. 24, 2026].
- [29] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [30] K. J. Rawson and E. C. Tupper, *Basic Ship Theory*, 5th ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021.
- [31] F. De Luca, C. Pensa, and S. Mancini, "SST k-omega Turbulence Model Performance for High-Speed Planning Hulls," *Ocean Engineering*, vol. 192, Art. no. 106512, 2019.
- [32] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture: Resistance, Propulsion and Vibration*, Alexandria, VA: SNAME, 2018.
- [33] Z. Song, et al., "Numerical Study on the Influence of Interceptor and Stern Flap on the Hydrodynamic Performance of a Deep-Vee Vessel," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 6, p. 929, 2024.
- [34] A. Avci and B. Barlas, "An experimental investigation of interceptors for a high-speed hull form," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 256–270, 2018.
- [35] V. Syamsundar and R. Datla, "Hydrodynamic performance analysis of transom appendages on fast transport ships," *Ocean Engineering*, vol. 210, pp. 104–118, 2021.
- [36] D. Savitsky, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls," *Marine Technology and SNAME News*, vol. 1, no. 4, pp. 71–95, 1964.
- [37] S. Samuel, et al., "Advancing Interceptor Design: Analyzing the Impact of Extended Stern Form on Deep-V Planing Hull," *Brodogradnja*, vol. 75, no. 2, pp. 45–62, 2024.
- [38] M. Mansoori and A. C. Fernandes, "Interceptor and trim tab combination to prevent interceptor's unfit effects," *Ocean Engineering*, vol. 134, pp. 140–156, 2017.
- [39] J. F. Tsai dan J. L. Hwang, "Study on the compound effects of interceptor with stern flap for two fast monohulls," dalam *Proc. Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04*, Kobe, Japan, hlm. 1023–1028 Vol. 2, 2004.
- [40] Mansoori, M., Fernandes, A.C. Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments. *J Hydrodyn* 27, 919–933 (2015)
- [41] Putra, Arfis Maydino Firmansyah, and Hiroyoshi Suzuki. "An Experimental Study on the Effects of Interceptors with Angle of Attack Adjustments for a High-Speed Ship." Paper presented at the The 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference, Ottawa, Canada, June 2023.