

## ANALISIS PENGARUH KONFIGURASI HYDROFOIL TERHADAP DINAMIKA FLUIDA KAPAL

\*Zuhdi Riliant Kusuma<sup>1</sup>, Mohammad Ariyanto<sup>2</sup>, Mohammad Tauviqirrahman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: zuhdiriliant@gmail.com

### Abstrak

Penggunaan *hydrofoil* pada kapal berkecepatan tinggi mampu meningkatkan efisiensi hidrodinamika dengan mengurangi hambatan total dan menghasilkan gaya angkat yang mengangkat lambung kapal. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi konfigurasi *hydrofoil*—Conventional, Tandem, dan Canard—terhadap gaya angkat, gaya hambat, serta kebutuhan *Effective Horse Power* (EHP) menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis ANSYS Fluent. Simulasi dilakukan pada kecepatan 10–50 knot dengan model turbulensi  $k-\omega$  SST dan metode *Volume of Fluid* (VOF). Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi Canard menghasilkan gaya angkat tertinggi yaitu 0,5992 N pada Froude Number 1,642, serta hambatan total terendah yaitu 0,1643 N. Konfigurasi ini mereduksi hambatan sebesar 37,56% dibandingkan kapal tanpa *hydrofoil* dan menghasilkan nilai EHP paling rendah yaitu 5745,07 HP pada kecepatan 50 knot. Konfigurasi Canard dinilai paling efisien dalam meningkatkan performa kapal cepat.

**Kata Kunci:** *cfd; drag force; effective horse power; hydrofoil; lift force*

### Abstract

The use of hydrofoils in high-speed vessels improves hydrodynamic efficiency by reducing total resistance and generating lift to raise the hull. This study analyzes the effect of three hydrofoil configurations—Conventional, Tandem, and Canard—on lift force, drag force, and Effective Horse Power (EHP) using Computational Fluid Dynamics (CFD) with ANSYS Fluent. Simulations were conducted at speeds ranging from 10 to 50 knots using the  $k-\omega$  SST turbulence model and Volume of Fluid (VOF) multiphase method. Results show that the Canard configuration produces the highest lift force of 0.5992 N at a Froude Number of 1.642 and the lowest total resistance of 0.1643 N. This configuration reduces resistance by 37.56% compared to a non-hydrofoil vessel and yields the lowest EHP requirement of 5745.07 HP at 50 knots. Therefore, the Canard configuration is the most efficient for high-speed hydrofoil applications.

**Keywords:** *cfd; drag force; effective horse power; hydrofoil; lift force*

### 1. Pendahuluan

Aplikasi hidrofoil dalam teknik kelautan, seperti perahu layar balap dan feri penumpang cepat, semakin berkembang dan semakin penting secara ekonomi. Penggunaan *hydrofoil* ini digunakan untuk menghasilkan daya angkat guna menopang sebagian atau seluruh berat kapal, sehingga mengurangi hambatan hidrodinamik, karena sebagian besar lambung kapal terangkat keluar dari air[1].

Pertumbuhan kebutuhan transportasi laut yang cepat, efisien, dan hemat energi mendorong pengembangan teknologi kapal berkecepatan tinggi. Salah satu tantangan utama dalam desain kapal cepat adalah tingginya hambatan total yang terdiri dari hambatan viskos, hambatan gelombang, dan hambatan udara. Hambatan yang besar mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan menurunkan efisiensi propulsi.

*Hydrofoil* merupakan salah satu inovasi hidrodinamika yang mampu mengatasi masalah tersebut. *Hydrofoil* bekerja menghasilkan gaya angkat (*lift*) saat bergerak melalui air sehingga mampu mengangkat lambung kapal, mengurangi luas permukaan basah, dan menurunkan hambatan total. Dengan kurangnya hambatan, kapal dapat bergerak lebih cepat dan efisien. Teknologi ini telah digunakan pada kapal penumpang cepat, kapal patroli, hingga wahana laut modern seperti *autonomous surface vehicles* (ASV).

Konfigurasi hidrofoil yang sepenuhnya terendam merupakan faktor kunci dalam peningkatan efisiensi kecepatan dan kualitas berkendara. Pada kecepatan tinggi, hidrofoil menghasilkan daya angkat, mengangkat struktur lambung di atas permukaan air. Selama fase lepas landas awal, hidrofoil menghadapi peningkatan hambatan akibat transisi dari mode perpindahan ke mode planing. Saat hidrofoil berakselerasi, foil menghasilkan daya angkat, mengurangi luas permukaan basah dan berkontribusi pada penurunan hambatannya dibandingkan dengan kapal perpindahan konvensional[2].

Kinerja *hydrofoil* sangat dipengaruhi oleh bentuk *foil*, sudut serang, ukuran, serta konfigurasi penempatannya. Tiga konfigurasi utama yang banyak digunakan adalah Conventional, Tandem, dan Canard. Setiap konfigurasi menghasilkan distribusi gaya angkat dan momen *trim* yang berbeda. Misalnya, konfigurasi Conventional menempatkan *foil* utama di depan, sedangkan konfigurasi Canard menempatkannya di belakang sehingga menghasilkan kestabilan longitudinal lebih baik. Perbedaan konfigurasi ini berpengaruh langsung terhadap nilai *lift force*, *drag force*, *trim angle*, dan kebutuhan daya.

Kemajuan teknologi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memungkinkan analisis hidrodinamika secara lebih detail tanpa harus melakukan pengujian fisik. Melalui CFD, perilaku fluida, interaksi antara air dan udara, pembentukan gelombang, serta gaya yang bekerja pada kapal dapat dianalisis secara komprehensif. Pada penelitian ini digunakan ANSYS Fluent dengan model turbulensi k- $\omega$  SST dan metode *Volume of Fluid* (VOF) yang efektif untuk memodelkan permukaan bebas dan aliran berkecepatan tinggi.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh konfigurasi hydrofoil terhadap gaya angkat, gaya hambat, hambatan total, dan kebutuhan *Effective Horse Power* (EHP) pada kecepatan 10–50 knot. Hasil penelitian diharapkan menjadi acuan dalam pengembangan desain kapal cepat yang lebih efisien secara hidrodinamika.

## 2. Dasar Teori

Penelitian mengenai kinerja *hydrofoil* pada kapal cepat didasarkan pada prinsip dasar dinamika fluida, gaya aerohidrodinamika, serta karakteristik konfigurasi *foil* yang memengaruhi *lift* dan *drag*. *Hydrofoil* bekerja serupa dengan *airfoil*, menghasilkan gaya angkat ketika fluida mengalir di sekitarnya akibat perbedaan tekanan pada permukaan atas dan bawah *foil* [3]. Ketika kecepatan meningkat, gaya angkat yang dihasilkan mampu mengurangi gaya apung kapal sehingga luas permukaan basah berkurang dan drag total menurun.

Beberapa konfigurasi *hydrofoil* yaitu conventional, tandem, dan canard. Ketiga konfigurasi tersebut memiliki distribusi beban berbeda, sehingga memengaruhi besar gaya angkat, *trim*, serta efisiensi hidrodinamis [4]. Konfigurasi conventional memiliki ciri *foil* utama di depan, respons angkat cepat namun menghasilkan momen *pitch* lebih besar. Konfigurasi tandem menghasilkan gaya angkat yang terbagi merata, stabil pada kecepatan menengah. Sedangkan konfigurasi canard memiliki ciri *foil* utama di belakang, lebih stabil pada kecepatan tinggi, hambatan lebih kecil.

Gaya angkat (*lift*) dihitung menggunakan pendekatan Bernoulli dengan persamaan koefisien *lift* sebagaimana diturunkan dalam aerodinamika fluida [5]. Sementara gaya hambat (*drag*) merupakan gabungan dari hambatan viskos, hambatan gelombang, dan hambatan udara. Hambatan viskos dipengaruhi oleh luas permukaan basah dan kekasaran permukaan, sedangkan hambatan gelombang timbul akibat pembentukan gelombang permukaan kapal [6]. Efisiensi hidrodinamik *hydrofoil* dapat dievaluasi melalui rasio *lift* terhadap *drag* serta perubahan hambatan total saat kapal *foilborne* [7]. Profil NACA yang digunakan dalam penelitian ini adalah NACA 63(2)-615.

Simulasi aliran fluida dilakukan menggunakan pendekatan numerik solusi persamaan Navier–Stokes untuk dua fluida (air–udara) menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Persamaan kontinuitas dan momentum digunakan untuk memprediksi distribusi tekanan, kecepatan, dan pola aliran di sekitar *foil* dan lambung [8]. Pada penelitian ini, metode *Volume of Fluid* (VOF) digunakan untuk menangani permukaan bebas, sedangkan model turbulensi k- $\omega$  SST digunakan karena sensitivitasnya terhadap gradien kecepatan dekat dinding.

*Lift Force* dan *Drag Force* bisa dihitung menggunakan rumus :

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A; F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$$

Nilai CL atau koefisien *lift* dan CD atau koefisien *drag* diperoleh dari simulasi CFD. *Hydrofoil* memengaruhi posisi longitudinal kapal melalui perubahan gerakan vertikal (*heave*) dan sudut *trim*, sehingga berdampak pada hambatan total.

*Output* hambatan total kemudian digunakan untuk menghitung *Effective Horse Power* (EHP), yaitu daya yang diperlukan untuk mengatasi hambatan total kapal pada kecepatan tertentu[9]. Dengan demikian, EHP menjadi parameter penting untuk menilai efisiensi desain *hydrofoil* dan memprediksi kebutuhan daya pada skala penuh. Untuk mencari nilai EHP bisa menggunakan rumus berikut.

$$EHP = R_t \times V$$

Selain faktor distribusi tekanan pada hydrofoil, karakteristik aliran pada permukaan bebas juga berperan penting dalam mempengaruhi performa kapal berkecepatan tinggi. Pada kondisi transisi antara *hullborne* menuju *foilborne*, terbentuk pola gelombang kompleks berupa *bow wave* dan *divergent wave* yang menyebabkan variasi tekanan dinamis di sekitar *foil* dan *strut*. Perubahan elevasi free-surface dan interaksi gelombang dekat permukaan dapat menurunkan efisiensi foil hingga 15% ketika foil beroperasi pada jarak kurang dari satu chord dari permukaan air[10]. Selain itu, efek free-surface dan fenomena wave–foil interaction dapat meningkatkan drag gelombang dan mempengaruhi stabilitas longitudinal kapal, terutama pada desain multi-foil seperti konfigurasi Tandem dan Canard. Pemahaman

---

mendalam mengenai fenomena ini penting dalam optimasi desain hydrofoil untuk memastikan efisiensi maksimum pada kecepatan tinggi.

### 3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh tiga konfigurasi *hydrofoil* (Conventional, Tandem, dan Canard) terhadap performa hidrodinamika kapal pada kecepatan 10–50 knot melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Model kapal dan konfigurasi *foil* dibuat menggunakan perangkat lunak CAD dan diekspor ke ANSYS fluent untuk proses simulasi. Domain fluida dibentuk menyerupai kanal terbuka dengan batas depan 2L, batas belakang 5L, sisi samping 2L, dan elevasi permukaan bebas sebagai *free surface*. *Meshering* dilakukan menggunakan gabungan *polyhedral mesh* dan *inflation layer*, kemudian diuji independensi *mesh* hingga perubahan gaya hambat kurang dari 2%.

Simulasi dijalankan menggunakan persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan model turbulensi  $k-\epsilon$  *realizable* dan metode *Volume of Fluid* (VOF) untuk menangani dua fasa (air–udara). Kondisi batas meliputi *velocity inlet* untuk rentang kecepatan yang dikonversi dari Froude Number ( $Fr = 0.3285\text{--}1.642$ ), *pressure outlet*, *no-slip wall* pada lambung kapal dan *hydrofoil*, serta batas simetri di bagian atas *domain*. Setiap konfigurasi disimulasikan pada lima nilai  $Fr$  hingga mencapai konvergensi residual  $<10^{-4}$ .

Parameter utama yang dianalisis meliputi gaya angkat (*lift*), gaya hambat total (*drag*), serta respons gerak (*trim* dan *heave*). Nilai *drag* kemudian digunakan untuk menghitung *Effective Horse Power* (EHP) dengan persamaan berikut.

$$EHP = R_t \times V$$

Yang kemudian dikonversi ke skala penuh menggunakan hukum kesebandingan Froude ( $\lambda=100$ ). Seluruh hasil diproses menjadi grafik dan tabel untuk membandingkan kinerja ketiga konfigurasi *hydrofoil*.

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan tren hambatan total dan koefisien gaya yang dihasilkan *CFD* terhadap teori ITTC dan karakteristik hidrodinamika pada *hull form* serupa yang dilaporkan dalam literatur. Setelah seluruh simulasi mencapai konvergensi residual  $<10^{-4}$ , data gaya disaring menggunakan metode *force monitoring* untuk memastikan kestabilan gaya dalam domain waktu.

Setiap konfigurasi *hydrofoil* kemudian dianalisis pada lima nilai Froude Number, dan gaya yang diekstraksi meliputi *pressure drag*, *viscous drag*, dan *wave-making resistance*. Selanjutnya, hasil simulasi model skala 1:100 dikonversi ke skala penuh menggunakan hukum kesebandingan Froude, dan digunakan untuk menghitung *Effective Horse Power* (EHP) pada tiap kecepatan. Prosedur ini memastikan bahwa performa *hydrodynamic* seperti *lift*, *drag*, *trim*, dan *heave* dapat dianalisis secara komprehensif untuk membandingkan efisiensi tiga konfigurasi *hydrofoil*.

### 4. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini menyajikan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan dari pengujian simulasi CFD menggunakan *software* ANSYS untuk melihat pengaruh konfigurasi *hydrofoil* terhadap gaya angkat, gaya hambat, dan nilai *Effective Horse Power* dari kapal.

#### 4.1 Analisis Lift Force

Gaya angkat (*lift force*) merupakan parameter utama untuk mengetahui kemampuan *hydrofoil* dalam mengangkat sebagian massa kapal sehingga mengurangi luas permukaan basah. Pada simulasi CFD, *lift* dihitung berdasarkan perbedaan tekanan pada permukaan atas dan bawah *hydrofoil*. Ketiga konfigurasi diuji pada Froude Number 1.642 yang setara dengan kecepatan sekitar 50 knot.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *lift* berbeda cukup signifikan antar konfigurasi:

- Conventional: 0,5745 N
- Tandem: 0,5867 N
- Canard: 0,5992 N

Konfigurasi Canard menghasilkan *lift* tertinggi. Hal ini dapat dijelaskan dari karakteristik aliran: konfigurasi Canard menempatkan *foil* kecil di bagian depan untuk *pre-conditioning* aliran, sehingga aliran yang masuk ke *foil* utama di belakang lebih terarah dan memiliki sudut serang efektif yang lebih menguntungkan. Akibatnya, distribusi tekanan antara permukaan atas dan bawah *foil* meningkat, menghasilkan gaya angkat lebih besar.

Selain itu, pengaturan jarak antara *foil* depan dan belakang pada konfigurasi Canard menghasilkan interaksi aliran yang lebih baik dibandingkan konfigurasi Tandem. Pada konfigurasi Conventional, *foil* utama berada di depan sehingga aliran yang keluar dari *foil* mengalami turbulensi lebih tinggi saat mencapai bagian belakang lambung kapal. Kondisi ini membuat *lift* pada konfigurasi Conventional lebih rendah dibanding dua konfigurasi lain. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi Canard paling efektif dalam meningkatkan gaya angkat, terutama pada kecepatan tinggi.

#### 4.2 Analisis Drag Force

Analisis gaya hambat dilakukan untuk melihat bagaimana perubahan konfigurasi *hydrofoil* memengaruhi kinerja hidrodinamika kapal pada berbagai Froude Number. Komponen *drag* yang dianalisis terdiri dari hambatan viskos, hambatan gelombang, dan hambatan udara.

##### 4.2.1 Hambatan Viskos

Hambatan viskos berasal dari gesekan antara fluida dan permukaan kapal. Ketika kecepatan meningkat dan kapal mulai *foilborne*, nilai viskos berkangur signifikan terutama pada konfigurasi *hydrofoil*.

**Tabel 1.** Gaya Hambatan Viskos Kapal

Froude Number	Original	Conventional	Tandem	Canard
0.3285	0.1140	0.0119	0.0119	0.0119
0.6570	0.0388	0.0391	0.0390	0.0388
0.9855	0.0792	0.0690	0.0671	0.0653
1.314	0.1322	0.0932	0.0841	0.0798
1.642	0.1967	0.0309	0.0153	0.0125

Pada Fr tertinggi, hambatan viskos turun lebih dari 90% dari model original, dan konfigurasi Canard selalu menjadi konfigurasi paling efisien.

##### 4.2.2 Hambatan Gelombang

Hambatan gelombang dipengaruhi oleh pola pembangkitan gelombang pada lambung dan strut *hydrofoil*. *Hydrofoil* cenderung meningkatkan *wave drag*, tetapi antar-konfigurasi tetap terdapat perbedaan performa.

**Tabel 2.** Gaya Hambatan Gelombang Kapal

Froude Number	Original	Conventional	Tandem	Canard
0.3285	0.0022	0.0089	0.0081	0.0101
0.6570	0.0209	0.0378	0.0348	0.0376
0.9855	0.0317	0.0804	0.0770	0.0837
1.314	0.0445	0.1275	0.1271	0.1377
1.642	0.0617	0.1767	0.1678	0.1482

Meskipun nilai *wave drag* *hydrofoil* lebih besar dibanding kapal original, Canard tetap paling rendah di antara ketiga konfigurasi *foil*.

##### 4.2.3 Hambatan Udara

Hambatan udara merupakan komponen paling kecil dari *total drag* dan nilainya meningkat sangat sedikit seiring kenaikan kecepatan.

**Tabel 3.** Gaya Hambatan Udara Kapal

Froude Number	Original	Conventional	Tandem	Canard
0.3285	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
0.6570	0.0009	0.0009	0.0008	0.0009
0.9855	0.0018	0.0018	0.0015	0.0017
1.314	0.0047	0.0025	0.0027	0.0033
1.642	0.0047	0.0052	0.0036	0.0036

Hambatan udara relatif kecil dan tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap total *drag*. Konfigurasi Canard dan Konfigurasi Tandem memiliki nilai yang terkecil pada kecepatan 50 knot atau pada Froude Number 1.642.

#### 4.3 Analisis Hambatan Total

Hambatan total kapal diperoleh dari penjumlahan tiga komponen utama, yaitu hambatan viskos, hambatan gelombang, dan hambatan udara. Berdasarkan data simulasi CFD pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.3, tren hambatan total menunjukkan bahwa konfigurasi *hydrofoil* belum memberikan keuntungan pada kecepatan rendah, namun mulai menghasilkan reduksi hambatan secara signifikan ketika kapal memasuki kondisi *foilborne* pada Froude Number tinggi ( $Fr \geq 1.314$ ).

Pada kecepatan rendah hingga menengah ( $Fr = 0.3285$ – $0.9855$ ), seluruh konfigurasi *hydrofoil* menghasilkan hambatan yang lebih besar dibanding kapal original. Hal ini disebabkan hadirnya elemen tambahan berupa *foil* dan *strut* yang masih sepenuhnya berada di dalam air sehingga menambah drag viskos dan drag gelombang. Namun, perbedaan ini mulai berbalik ketika kapal mencapai  $Fr = 1.314$ , di mana konfigurasi Tandem dan Canard menunjukkan penurunan drag viskos akibat semakin berkurangnya *wetted surface area* karena kapal mulai terangkat.

Performa terbaik terlihat jelas pada  $Fr = 1.642$  ( $\approx 50$  knot), ketika badan kapal hampir sepenuhnya terangkat dan

gaya angkat *hydrofoil* menjadi dominan. Hambatan total kapal original mencapai 0.2631 N, sedangkan konfigurasi *hydrofoil* mengalami reduksi *drag* sebagai berikut.

**Tabel 4.** Nilai Hambatan Total pada Fr 1.642

Froude Number	Original (N)	Conventional (N)	Tandem (N)	Canard (N)
1.642	0.2631	0.2127	0.1866	0.1643

Reduksi hambatan dibanding kapal original:

Conventional : 19.14%

Tandem : 29.07%

Canard : 37.56%

Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi Canard memberikan performa hidrodinamis paling efisien karena mampu mengurangi hambatan total secara terbesar melalui kombinasi pengurangan *wetted surface area*, pembentukan gelombang yang lebih stabil, dan distribusi *lift* yang lebih merata. Hal ini juga menjelaskan mengapa konfigurasi Canard memberikan nilai EHP paling rendah pada kecepatan maksimum.

#### 4.4 Analisis Effective Horse Power (EHP)

Analisis *Effective Horse Power* (EHP) dilakukan untuk menentukan daya minimum yang dibutuhkan kapal dalam mengatasi gaya hambat total pada setiap kondisi Froude Number. Nilai EHP dihitung dari hasil simulasi hambatan total dan kecepatan aliran, kemudian dikonversi ke skala penuh menggunakan hukum kesebandingan Froude dengan faktor  $\lambda^3 = 1.000.000$ . Secara umum, EHP meningkat seiring bertambahnya kecepatan, namun perbedaan antar konfigurasi *hydrofoil* menjadi jelas ketika kapal memasuki kondisi *foilborne* ( $Fr \geq 1.314$ ).

Pada kecepatan rendah ( $Fr = 0.3285$ – $0.9855$ ), konfigurasi *hydrofoil* memiliki EHP lebih tinggi dibanding kapal original akibat tambahan *drag* dari *strut* dan *foil*. Namun pada Fr tinggi, terutama  $Fr = 1.642$  ( $\approx 50$  knot), keunggulan *hydrofoil* sangat signifikan.

**Tabel 5.** Perhitungan EHP pada Fr 1.642

$Fr = 1.642$ ( $V = 25.72$ m/s)				
Konfigurasi	Rt (N)	P model (W)	P model (HP)	P full (HP)
Original	0.2631	6.76648	0.0090734	9073.4
Conventional	0.2127	5.46947	0.00733496	7334.96
Tandem	0.1866	4.79832	0.00643325	6433.25
Canard	0.1643	4.22489	0.0056651	5665.1

Nilai EHP *full-scale* yang dihitung menunjukkan bahwa konfigurasi Canard memiliki kebutuhan daya terendah, yaitu 5,665 HP, disusul Tandem sebesar 6,433 HP, dan Conventional sebesar 7,335 HP, sedangkan kapal original membutuhkan daya terbesar yaitu 9,073 HP. Perbedaan ini terjadi karena konfigurasi Canard menghasilkan *drag* total paling kecil pada kondisi *foilborne*, sehingga EHP yang diperlukan juga paling rendah. Dengan demikian, Canard merupakan konfigurasi paling efisien secara hidrodinamika pada kecepatan tinggi.

#### 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD terhadap tiga konfigurasi *hydrofoil* (Conventional, Tandem, dan Canard) pada rentang kecepatan 10–50 knot ( $Fr = 0.3285$ – $1.642$ ), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada kecepatan rendah, seluruh konfigurasi *hydrofoil* menunjukkan hambatan total dan *EHP* yang lebih besar dibandingkan kapal tanpa *foil* (original) karena *foil* dan *strut* masih berada sepenuhnya di dalam air sehingga menambah *drag viskos* dan *drag gelombang*.
2. Kondisi *foilborne* mulai dicapai pada  $Fr \geq 1.314$ , ditandai dengan meningkatnya gaya angkat dan berkurangnya luas permukaan basah. Pada kondisi ini, *drag* total konfigurasi *hydrofoil* mulai lebih rendah dibanding kapal original.
3. Pada kecepatan tertinggi ( $Fr = 1.642$ , sekitar 50 knot), konfigurasi Canard menghasilkan performa hidrodinamika terbaik dengan hambatan total 0.1643 N, lebih rendah dibandingkan Tandem (0.1866 N), Conventional (0.2127 N), dan Original (0.2631 N). Hal ini menyebabkan *EHP* Canard menjadi yang paling efisien, hanya 5,665 HP, sementara Original memerlukan 9,073 HP.
4. Konfigurasi Canard terbukti paling efisien pada kecepatan tinggi karena menghasilkan distribusi gaya angkat yang stabil, mengurangi *wetted surface area* secara signifikan, serta menekan *drag gelombang* dan *drag viskos* lebih baik dibanding dua konfigurasi lainnya.
5. Secara keseluruhan, penggunaan *hydrofoil* terbukti efektif dalam meningkatkan performa kapal pada kecepatan tinggi, namun kurang menguntungkan pada kecepatan rendah akibat peningkatan *drag* awal sebelum mencapai kondisi *foilborne*.

---

**6. Daftar Pustaka**

- [1] L. Pernod, E. Navale, M. Sacher, B. Augier, P. Bot, and E. Navale, “Free-Surface Effects on Two-Dimensional Hydrofoils by RANS-VOF Simulations,” vol. 8, no. 1, pp. 24–38, 2025.
- [2] K. Akbari, H. Reza, and H. Ghassemi, “Investigation of front hydrofoil position influence on the hydrofoil-assisted craft,” *Ocean Eng.*, vol. 304, no. April, p. 117901, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117901.
- [3] L. Volt, “Hydrofoils Applications to Windsurfing,” pp. 1–86, 2016.
- [4] M. R. D. A. Kusuma, D. Chrismianto, and S. Jokosiworo, “Pengaruh Posisi Foil Terhadap Gaya Angkat Dan Hambatan Kapal Katamaran,” *Kapal*, vol. 14, no. 2, p. 58, 2017, doi: 10.14710/kpl.v14i2.16487.
- [5] R. A. D. I. Pangestu, P. Studi, T. Mesin, J. Teknik, M. Fakultas, and U. Malikussaleh, *ANALISIS AERODINAMIKA BODY MOBIL LISTRIK DENGAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC ( CFD ) PADA VARIASI FRONTAL AREA DAN KECEPATAN ALIRAN UDARA MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS*. 2024.
- [6] P. M. Sforza, “Direct calculation of zero-lift drag coefficients and L/D max in subsonic cruise,” *J. Aircr.*, vol. 57, no. 6, pp. 1224–1228, 2020, doi: 10.2514/1.C035717.
- [7] Z. Song, J. Zhu, and C. Wang, “Optimization of semi-active hydrofoil propulsion performance based on CFD Taguchi method and neural network,” *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 105, no. August 2023, pp. 327–337, 2024, doi: 10.1016/j.euromechflu.2024.02.005.
- [8] W. Sheng, “A revisit of Navier–Stokes equation,” *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 80, pp. 60–71, 2020, doi: 10.1016/j.euromechflu.2019.12.005.
- [9] U. of S. Anthony F. Molland, University of Southampton, Stephen R. Turnock, University of Southampton, Dominic A. Hudson, *Ship resistance and propulsion*. 2017.
- [10] P. Perali *et al.*, “Performance prediction of a hydrofoil near the free surface using low ( BEM ) and high ( RANS ) fidelity methods,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 151, no. July, p. 104157, 2024, doi: 10.1016/j.apor.2024.104157.