



80-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

ANALISIS PERFORMANCE *HULL VANE* NACA 4418 pada KAPAL PATROLI 14,1 M DENGAN VARIASI SUDUT SERANG 5° DAN 10° MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Edy Haryanto¹⁾, Jodi Gustian¹⁾,

¹⁾ Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis
Jl. Bathin Alam, Sungai Alam, Bengkalis, Riau 28711, Indonesia

Corresponding Author: Edyharyanto@polbeng.ac.id

Article Info

Keywords:

Kapal Patroli; *Hull Vane*;
Naca 4418; *Resistance reduction*
Computational Fluid Dynamics;
Angle of Attack.

Article history:

Received: 02/06/2026
Last revised: 17/06/2026
Accepted: 18/06/2026
Available online: 24/06/2026
Published: 24/06/2026

DOI:[https:// 10.35314/v447qr94](https://10.35314/v447qr94)

Abstract

Kapal patroli merupakan aset strategis bagi Indonesia untuk menjaga kedaulatan perairan, dengan karakteristik kecepatan tinggi, manuver baik, dan efisiensi bahan bakar optimal. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh sudut serang *Hull Vane* NACA 4418 terhadap hambatan total kapal patroli 14,1 m pada 25 knot ($Fn \approx 0,65$). Simulasi numerik 3D dilakukan dengan ANSYS Fluent 2020 R2 (pressure-based, steady, single phase) dan turbulensi $k-\omega$ SST, dengan variasi sudut 5° dan 10°. Simulasi menggunakan model skala 1:5 (LWL=2,4 m) mengikuti praktik uji tarik. Validasi terhadap rumus Holtrop-Mennen menunjukkan deviasi <3%. Hasil menunjukkan sudut 5° mengurangi hambatan model sebesar 7,8% (dari 134,59 N menjadi 124,16 N) dengan tekanan maksimum 7.566 Pa, sementara sudut 10° hanya mengurangi 3,5% dengan tekanan lebih tinggi (8.125 Pa). Visualisasi *streamline* dan kontur tekanan mengidentifikasi separasi aliran pada sisi hisap *foil* untuk sudut 10°, yang menyebabkan penurunan kinerja. Efisiensi propulsi meningkat 5,1% pada sudut 5°. Konfigurasi NACA 4418 sudut 5° terbukti memberikan reduksi hambatan terbaik di antara kedua variasi untuk kapal patroli ukuran kecil kecepatan tinggi. Penelitian ini memberikan data kuantitatif awal dan rekomendasi desain *Hull Vane* untuk retrofit kapal eksisting di Indonesia.

Abstrak

Abstract

Patrol boats are a strategic national asset for archipelagic countries such as Indonesia, playing a vital role in enforcing maritime sovereignty and securing vast territorial waters. Their operational effectiveness relies on high-speed cruising, superior maneuverability, and optimal fuel economy, as they frequently undertake prolonged sea missions. This study investigates the impact of the NACA 4418 hydrofoil (Hull Vane) attack angle on the total resistance of a 14.1-meter patrol boat cruising at 25 knots, corresponding to a Froude number of approximately 0.65. Three-dimensional numerical simulations were executed using ANSYS Fluent 2020 R2 with a pressure-based, steady-state, single-phase solver and the $k-\omega$ SST turbulence model, examining attack angles of 5° and 10°. The simulations were performed on a 1:5 scaled model (waterline length of 2.4 m), adhering to standard towing-tank testing protocols. Model validation against the Holtrop-Mennen empirical method for the bare hull showed a deviation below 3%. The findings reveal that the 5° angle reduces model resistance by 7.8% (dropping from 134.59 N to 124.16 N) with a peak pressure of 7,566 Pa, whereas the 10° angle achieves only a 3.5% reduction while exhibiting higher pressure (8,125 Pa). Visualization of streamlines and pressure contours identifies significant flow separation on the suction side at 10°, which degrades performance. Notably, propulsion efficiency improves by 5.1% at the optimal 5° configuration. Consequently, the NACA 4418 at a 5° attack angle delivers the most effective resistance reduction among the tested variants for small high-speed patrol vessels. This research offers preliminary quantitative evidence and practical Design guidance for retrofitting existing patrol boats operating in Indonesian waters.

1. PENDAHULUAN

Kapal patroli digunakan untuk menjaga keamanan dan kedaulatan wilayah perairan [10]. Kapal ini memiliki karakteristik kecepatan kapal yang tinggi, kemampuan manuver yang baik, serta

mengembangkan efisiensi bahan bakar yang optimal untuk operasi yang sering berlangsung lama di laut [13]. Hambatan kapal (*ship resistance*) memberi pengaruh yang sangat besar terhadap konsumsi bahan bakar; semakin besar hambatan, maka daya yang digunakan untuk mengoperasikan kapal juga semakin besar, sehingga meningkatkan biaya operasional kapal [1]. Berbagai teknologi untuk mengurangi hambatan kapal telah dikembangkan sebagai upaya penghematan konsumsi bahan bakar salah satunya diantaranya adalah *Hull Vane* yakni sebuah *fixed foil* yang dipasang di bawah garis air pada bagian buritan kapal [19]. Prinsip kerja *Hull Vane* dengan memanfaatkan gaya angkat (*lift*) melalui aliran air yang melewati *foil*. Komponen horizontal gaya angkat tersebut memberikan dorongan tambahan ke depan, sehingga dapat mengurangi hambatan total kapal [3]. Selain itu, *Hull Vane* juga berfungsi sebagai peredam gelombang buritan dan serta memperbaiki *trim* kapal [18]. Studi tentang dinamika kapal akibat perubahan geometri lambung [4] serta pemahaman mendasar tentang tahanan dan propulsi kapal [5] menjadi landasan penting dalam pengembangan teknologi hemat energi seperti *Hull Vane*.

Studi internasional telah melaporkan efektivitas *Hull Vane* pada berbagai tipe kapal. Uithof dkk. [20] menunjukkan bahwa pada *motor yacht* 42 m, *Hull Vane* mampu mengurangi hambatan total hingga mencapai 23% pada angka Froude 0,44. Pada kapal patroli 50 m [21]. Menemukan reduksi hambatan hingga 32,4% pada rentang kecepatan 8,6–34,4 knot [12]. Melaporkan bahwa *Hull Vane* tipe NACA 2415 dengan sudut serang 5° dapat mereduksi hambatan yang signifikan pada kapal perintis 750 DWT. Sihombing [14] mendapatkan reduksi 11,8% dengan tipe NACA 1410 sudut -5° . Penelitian terbaru [13]. Secara komprehensif menginvestigasi pengaruh *Hull Vane* pada kapal patroli menggunakan perangkat lunak SHIPFLOW. Mereka menyimpulkan bahwa konfigurasi yang tepat mampu mengurangi hambatan secara nyata pada kecepatan tinggi, dan menekankan pentingnya optimasi sudut serang serta posisi longitudinal *foil*. Selain itu, kajian tentang perubahan sistem penggerak kapal [6] juga menunjukkan bahwa optimalisasi komponen propulsi dapat meningkatkan kecepatan dan efisiensi operasional.

Namun demikian, permasalahan utama yang mendasari penelitian ini adalah masih minimnya pemahaman tentang perilaku aliran separasi yang terjadi pada permukaan *Hull Vane*, khususnya ketika digunakan pada kapal patroli berukuran kecil (panjang keseluruhan 14,1 m) dengan kecepatan dinas tinggi (25 knot). Kapal patroli ukuran kecil merupakan tulang punggung operasi pengawasan di wilayah perairan Indonesia yang sulit dijangkau kapal besar, sehingga efisiensi bahan bakar menjadi sangat kritis. Dalam praktiknya, pemasangan *Hull Vane* dengan sudut serang (*angle of attack*) yang tidak tepat justru dapat menimbulkan efek sebaliknya, yaitu peningkatan hambatan akibat terjadinya separasi aliran masif di bagian belakang *foil*. Separasi ini menyebabkan penurunan gaya angkat, kenaikan tekanan hambat (*pressure drag*), serta getaran pada struktur buritan yang mengganggu kenyamanan dan keandalan operasional kapal. Oleh karena itu, pemahaman tentang batas aman sudut serang sebelum terjadinya separasi menjadi prioritas utama dalam desain *Hull Vane* untuk kapal cepat berukuran sedang. Jika ditinjau lebih dalam dari studi-studi terdahulu, terdapat beberapa celah penelitian (*research gap*) yang belum terisi secara sistematis. Penelitian Uithof dkk. [2021] menunjukkan potensi reduksi hambatan yang sangat besar (hingga 32,4%) pada kapal patroli 50 m, namun objek kajiannya adalah kapal besar dengan rasio panjang terhadap lebar (*slenderness ratio*) yang berbeda secara signifikan dari kapal patroli 14,1 m. Sementara itu, penelitian Nugroho dkk. [12] dan Sihombing [14] lebih fokus pada kapal perintis 750 DWT menggunakan *foil* NACA 2415 dan NACA 1410, bukan tipe NACA 4418 yang memiliki karakteristik *camber* lebih tinggi sehingga menghasilkan gaya angkat lebih besar tetapi juga lebih rentan terhadap separasi [13]. Menggunakan pendekatan komputasi pada kapal patroli, tetapi masih terbatas pada variasi posisi longitudinal tanpa mengamati secara spesifik profil tekanan pada *foil* itu

sendiri. Dengan demikian, studi yang secara khusus mengeksplorasi perilaku aliran separasi pada *Hull Vane* tipe NACA 4418 dengan dua variasi sudut serang (5° dan 10°) pada kapal patroli berukuran 14,1 m masih sangat terbatas [15]. Padahal, pemahaman tentang *onset* separasi sangat penting untuk menghindari penurunan kinerja akibat sudut serang yang terlalu besar [17]. Parameter-parameter tersebut sangat diperlukan oleh para perancang kapal di kalangan-galangan rakyat Indonesia yang mulai mengadopsi teknologi *Hull Vane* namun belum memiliki panduan desain yang memadai.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, posisi (*research positioning*) penelitian ini memiliki perbedaan serta melengkapi studi-studi sebelumnya. Kebaruan (*novelty*) yang ditawarkan bukan hanya pada objek kapal dan tipe *foil*, tetapi juga pada pendekatan analisis yang mengintegrasikan tiga aspek sekaligus: (1) eksplorasi sistematis hubungan antara sudut serang (5° vs 10°) dan pola separasi aliran pada *foil* NACA 4418 yang dipasang pada kapal patroli ukuran kecil (14,1 m); (2) identifikasi hubungan antara sudut serang, tekanan maksimum, dan indikasi separasi aliran; (3) penyediaan data referensi untuk desain *Hull Vane* pada kapal patroli dengan kecepatan dinas 25 knot di perairan Indonesia. Dengan kata lain, penelitian ini tidak hanya menjawab "berapa besar reduksi hambatan", tetapi juga menjelaskan "mengapa dan pada sudut serang berapa reduksi itu mulai menurun karena separasi".

Secara spesifik, tujuan penelitian ini adalah: (1) menghitung hambatan total kapal patroli 14,1 m pada kecepatan 25 knot dengan kondisi tanpa *Hull Vane*, dengan *Hull Vane* sudut 5° , dan dengan sudut 10° ; (2) membandingkan distribusi tekanan statis pada lambung di sekitar area pemasangan *Hull Vane* untuk kedua sudut tersebut; (3) mengidentifikasi keberadaan dan luasan daerah separasi aliran di sekitar permukaan *foil* NACA 4418 melalui simulasi CFD; (4) menentukan konfigurasi sudut serang yang memberikan reduksi hambatan terbesar tanpa disertai separasi berbahaya. Sedangkan untuk manfaat penelitian dapat dibagi menjadi dua aspek: Manfaat teoretis berupa sumbangan pengetahuan di bidang hidrodinamika kapal cepat, khususnya tentang batas kritis sudut serang *Hull Vane* pada bilangan Reynolds menengah (orde 10^6 - 10^7). Selain itu, hasil distribusi tekanan yang diperoleh dapat menjadi data validasi untuk studi-studi serupa di masa depan.

Diharapkan penelitian ini mampu menjembatani kesenjangan antara potensi teoretis *Hull Vane* yang sangat besar (berdasarkan studi internasional) dengan implementasi nyata di kapal patroli ukuran kecil Indonesia yang memiliki keterbatasan ruang buritan dan pola operasi dengan percepatan serta perlambatan yang sering terjadi. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini tidak hanya bersifat akademik, tetapi juga aplikatif untuk meningkatkan kemandirian teknologi pertahanan dan keselamatan maritim nasional.

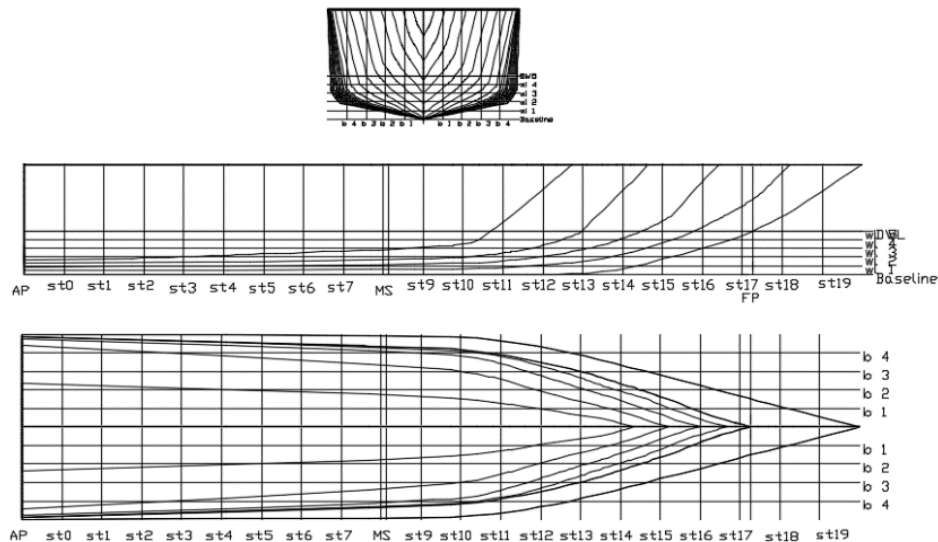
2. METODE

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah kapal patroli dengan ukuran utama seperti disajikan pada Tabel 1. Dengan kecepatan dinas 25 knot (12,86 m/s). Simulasi CFD dilakukan pada model skala 1:5 (LWL model = 2,4 m) mengikuti praktik standar uji tarik laboratorium. Seluruh nilai hambatan yang dilaporkan dalam makalah ini adalah hambatan model pada skala tersebut. Konversi ke skala penuh memerlukan penerapan hukum kesamaan Froude, namun di luar cakupan penelitian ini.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal Patroli

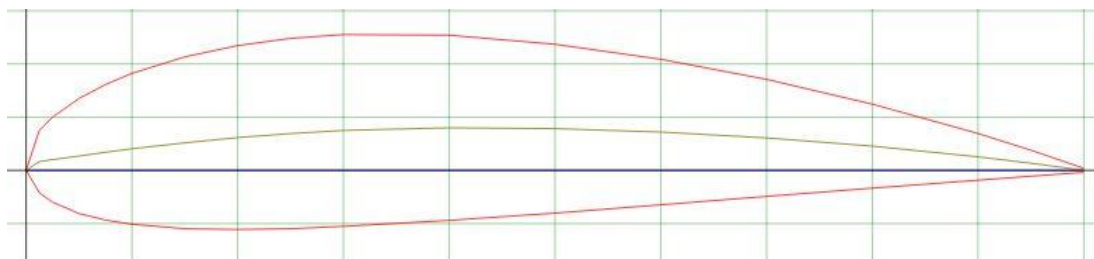
No	Parameter	Nilai	Satuan
1	LOA	14,10	m
2	LWL	12,00	m
3	Lebar (B)	3,20	m
4	Tinggi (H)	1,90	m
5	Sarat (T)	0,75	m
6	Kecepatan dinas	25	knot



Gambar 1. Lines Plan Kapal Penelitian Hull Vane
(Sumber: Hasil Design)

2.2 Design dan Variasi Hull Vane

Pemodelan 3D lambung kapal dilakukan menggunakan Maxsurf Modeler dan Rhinoceros 6. *Hull Vane* didesain dengan *span* 2,30 m (skala penuh), *chord* 0,34 m (skala penuh). Pemasangan *Hull Vane* pada posisi 2% LWL di belakang buritan dan 80% sarat di bawah garis air. Koordinat profil NACA 4418 diperoleh dari *Airfoil Tools* [11]. Data koordinat kemudian disalin ke *software* AutoCAD menggunakan perintah *spline* untuk membentuk profil 2D *foil*.



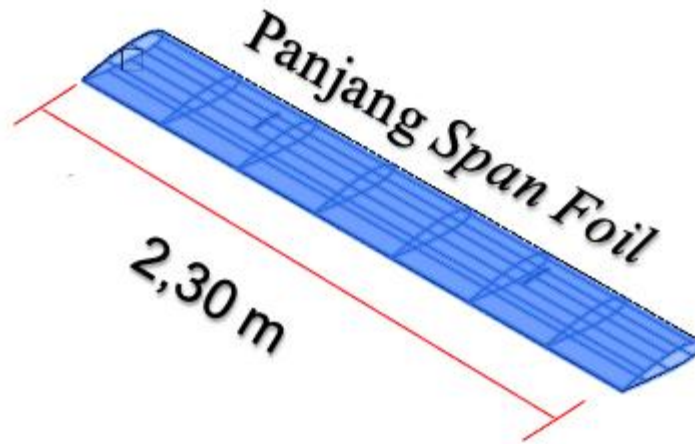
Gambar 2. Koordinat NACA 4418
(Sumber: *airfoils.com*)

Pada gambar 2. bentuk model tipe NACA 4418 dengan spesifikasi *Max Thickness* 18% at 30% Chord dan *Max Chamber* 4% at 40 % Chord. Pada penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan tipe-tipe NACA, salah satu tipe NACA 4418 ini belum ada menggunakan atau mengaplikasi kan pada kapal.

Tabel 2. *Koordinat NACA 4418*

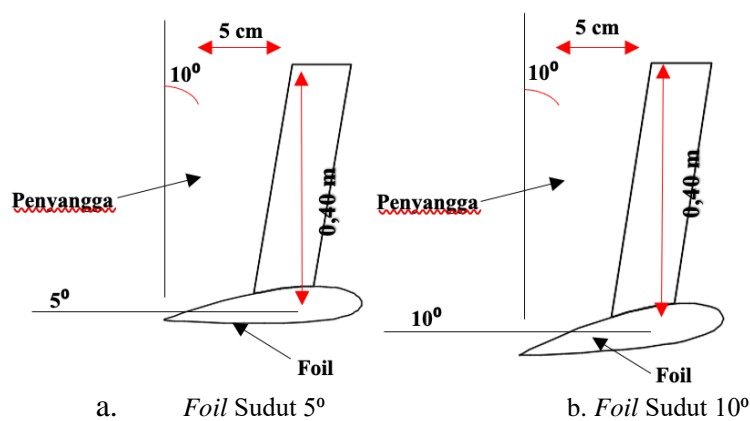
No	X	Y
1	1.0000	0.0019
2	0.9500	0.0189
3	0.9000	0.0346
4	0.8000	0.0622
5	0.7000	0.0855
6	0.6000	0.1044
7	0.5000	0.1185
8	0.4000	0.1270
9	0.3000	0.1276
10	0.2500	0.1240
11	0.2000	0.1172
12	0.1500	0.1066
13	0.1000	0.0911
14	0.0750	0.0806
15	0.0500	0.0675
16	0.0250	0.0500
17	0.0125	0.0376
18	0.0000	0.0000
19	0.0125	-0.0211
20	0.0250	-0.0299
21	0.0500	-0.0406
22	0.0750	-0.0467
23	0.1000	-0.0506
24	0.1500	-0.0549
25	0.2000	-0.0556
26	0.2500	-0.0549
27	0.3000	-0.0526
28	0.4000	-0.0470
29	0.5000	-0.0402
30	0.6000	-0.0324
31	0.7000	-0.0245
32	0.8000	-0.0167
33	0.9000	-0.0093
34	0.9500	-0.0055
35	1.0000	-0.0019

Selanjutnya, profil 2D tersebut di-extrude sepanjang span 2,30 m untuk menghasilkan model 3D foil.



Gambar 3. Span Foil
(Sumber: Hasil Olahan di Software Autocad)

foil NACA 4418 dibuat dua variasi sudut serang 5° dan 10° . Yang akan ditempatkan pada bagian buritan kapal. Gambar 3 mengilustrasikan desain sudut serang foil.



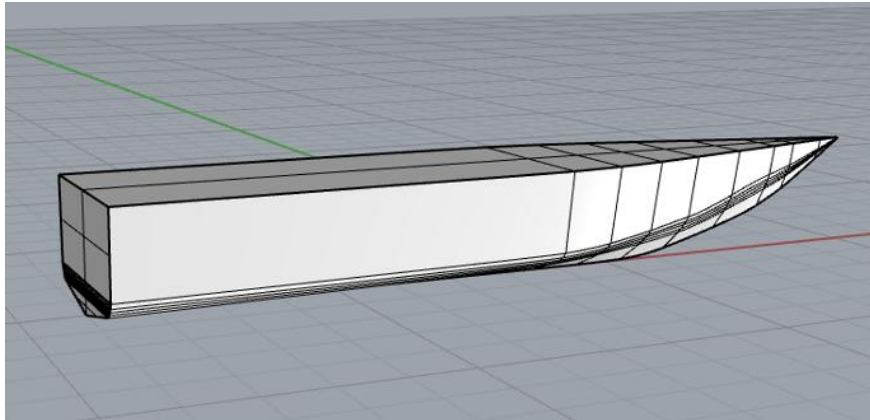
Gambar 4. Design foil sudut 5° dan 10°
(Sumber: Hasil Pemodelan CAD)

Variasi model yang diuji disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi Model *Hull Vane* Yang Diuji

Model	Span (m)	Chord (m)	Sudut	Jumlah Foil
NACA 4418	2,30	0,34	10°	1
NACA 4418	2,30	0,34	5°	1

Setelah semuanya di desain melalui software Autocad, variasi 3 model foil tersebut di import ke software Rhinoceros 6, dapat dilihat pada Gambar 5. dimana di software Rhinoceros akan menggabungkan foil Hull Vane dengan lambung kapal penelitian dengan masing-masing model kemudian pemodelan dibuat lebih solid.

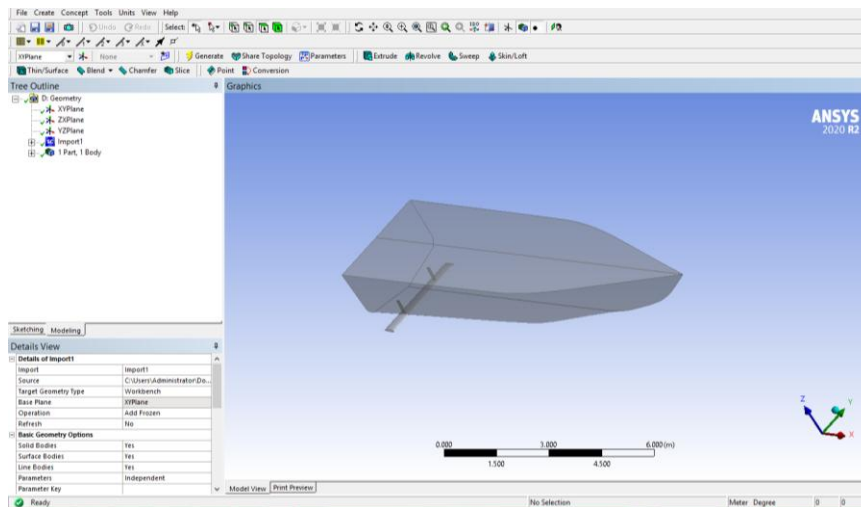


Gambar 5. Pemodelan Kapal Objek Penelitian Dengan Software Rhinoceros 6
(Sumber : Hasil Olahan)

2.3 Simulasi CFD

2.3.1. Geometri dan Domain

Domain komputasi berbentuk balok dengan ukuran mengacu pada rekomendasi ITTC (The International Towing Tank Conference) [7]: panjang domain $5 \times \text{LWL}$ di belakang kapal, $2 \times \text{LWL}$ di depan kapal, lebar $1 \times \text{LWL}$, dan tinggi $1 \times T$. Operasi *Boolean subtract* dilakukan untuk menghilangkan bagian kapal yang tidak tercelup air, sehingga domain hanya mencakup volume air yang mengelilingi badan kapal yang terendam.



Gambar 6. Solid Model
(Sumber: Hasil Pemodelan)

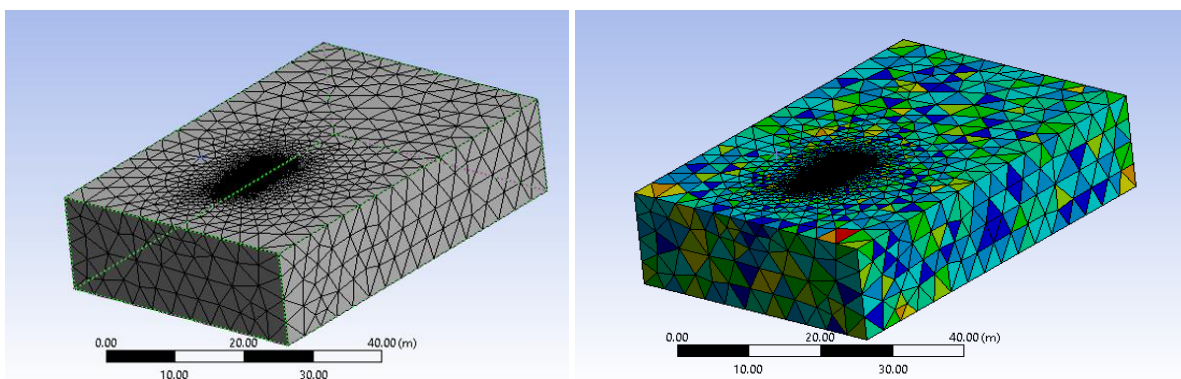
2.3.2. Meshing

Meshing menggunakan elemen tetrahedron dengan lapisan *inflation* di sekitar lambung dan *foil*. Jumlah elemen: model tanpa *Hull Vane* = 175.335; sudut 5° = 222.800; sudut 10° = 404.442. Parameter *inflation*: *first layer thickness* = 0,5 mm, *growth rate* = 1,2, jumlah lapisan = 5. Nilai y^+ rata-rata pada lambung ≈ 35 , pada *foil* ≈ 28 (dalam rentang yang dapat diterima untuk model turbulensi $k-\omega$ SST dengan *wall function*). Distribusi y^+ maksimum tercatat sebesar 42 pada lambung dan 35 pada *foil*, yang masih berada dalam rentang yang direkomendasikan untuk model $k-\omega$ SST dengan *wall function* ($30 < y^+ < 300$) [2]. *Skewness* dijaga $< 0,85$.

Uji Independensi Grid dilakukan untuk model sudut 5° dengan tiga tingkatan *mesh*: kasar (120.000 elemen), sedang (222.800 elemen), dan halus (450.000 elemen). Hasil uji menunjukkan perbedaan hambatan antara *mesh* sedang dan halus sebesar 1,2%, sedangkan perbedaan antara *mesh* kasar dan sedang sebesar 4,8%. Dengan demikian, *mesh* medium (222.800 elemen) dinyatakan cukup akurat karena telah mencapai konvergensi grid dengan perubahan < 1,5% terhadap *mesh* halus. Pendekatan *Richardson Extrapolation* dan *Grid Convergence Index* (GCI) juga diterapkan untuk memastikan keandalan hasil [0†L35-L40].

Tabel 4. Statistik *Meshing* Tiap Model

Model	Sudut	Jumlah Elemen
Original (tanpa <i>Hull Vane</i>)	–	175.335
NACA 4418	10°	404.442
NACA 4418	5°	222.800

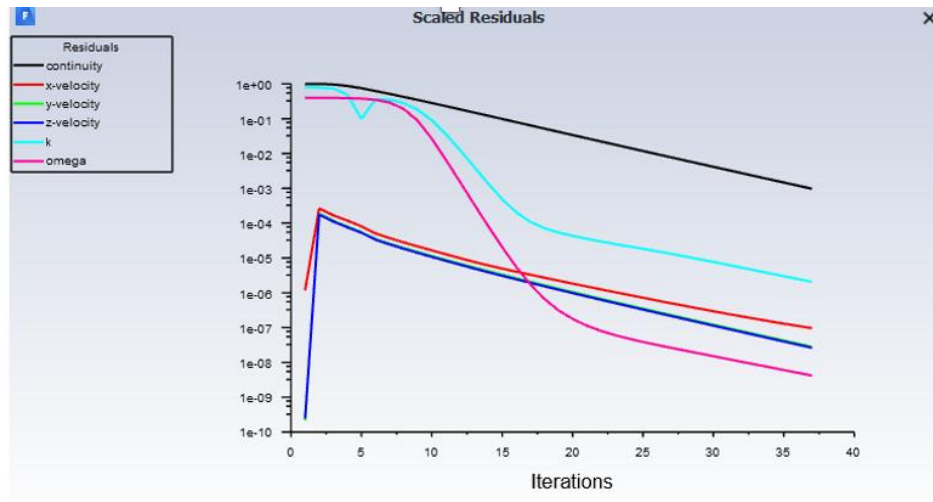


Gambar 7. *Meshing Geometry Skewness*
(Sumber: Hasil Olahan di *Software ANSYS*)

2.3.3. Setup dan Kondisi Batas

Simulasi menggunakan ANSYS Fluent 2020 R2 dengan konfigurasi:

- Solver: *pressure-based, steady-state, single phase* (air diabaikan, tanpa model *free surface*).
- Model turbulensi: *k- ω SST* [9] karena keunggulannya dalam menangani aliran dekat dinding dan separasi.
- Fluida: air laut, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,001025 \text{ kg/ms}$.
- Kondisi batas: kecepatan *inlet* seragam (setara 25 knot pada skala penuh dengan hukum *Froude*: $V_{\text{model}} = V_{\text{full}} / \sqrt[3]{(\text{scale})} = 12,86 / \sqrt[3]{5} = 5,75 \text{ m/s}$); *outlet* tekanan statis 0 Pa (relatif); dinding kapal, *foil*, lantai: *no-slip wall*.
- Skema kopling: *SIMPLEC*, diskritisasi orde dua.
- Kriteria konvergensi: residual $< 10^{-4}$ untuk semua persamaan, ditambah pemantauan nilai hambatan total (*drag*) yang stabil selama 200 iterasi terakhir (perubahan $< 0,5\%$).
- Arah gaya hambatan: sumbu-x negatif (lawan arah gerak kapal).
- Kondisi trim kapal: *fixed trim* (tanpa perubahan trim bebas).



Gambar 8. *Convergence Running Model*
(Sumber: Hasil Olahan di *Software ANSYS*)

2.3.4. Parameter yang Dianalisis

Parameter utama yang dianalisis Adalah hambatan total (gaya resultan pada arah sumbu-x negatif, dilaporkan oleh ANSYS *Fluent*), Tekanan statis maksimum pada permukaan lambung kapal dan Pola aliran (*streamline*) di sekitar *foil* untuk mengidentifikasi separasi.

2.4 Persamaan Matematis

Hambatan total kapal dihitung berdasarkan integrasi tekanan dan tegangan geser pada permukaan basah:

$$R_T = \oint_S (p \cdot \hat{n} + \tau_w) \cdot \hat{i} dS \quad (1)$$

dengan:

R_T = hambatan total (N)

p = tekanan statis pada permukaan (Pa)

τ_w = tegangan geser dinding (Pa)

\hat{n} = vektor normal satuan ke permukaan

\hat{i} = vektor satuan arah gerak kapal

Gaya angkat yang dihasilkan oleh *Hull Vane* dinyatakan sebagai:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A_f C_L \quad (2)$$

dengan:

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

V = kecepatan aliran (m/s)

A_f = luas proyeksi *foil* (m²)

C_L = koefisien gaya angkat

Koefisien hambatan total kapal didefinisikan sebagai:

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

dengan S = luas permukaan basah (m²).

Bilangan Reynolds untuk aliran sekitar kapal dihitung dengan:

$$Re = \frac{\rho V L_{WL}}{\mu} \quad (4)$$

dengan L_{WL} = panjang garis air (m) dan μ = viskositas dinamik (kg/m·s).

2.5 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan:

1. Simulasi satu fasa (tanpa permukaan bebas) sehingga efek gelombang air tidak diperhitungkan — ini mempengaruhi komponen *wave-making resistance* yang penting pada $Fn \approx 0,65$. Oleh karena itu, hasil reduksi hambatan yang dilaporkan lebih mencerminkan reduksi hambatan viskos daripada hambatan total aktual.
2. Simulasi *steady-state*, padahal aliran di belakang kapal cepat dapat bersifat tidak tunak (*unsteady*).
3. Tidak ada variasi posisi longitudinal *foil*, sehingga pengaruh posisi terhadap kinerja belum terpetakan.
4. Kondisi *fixed trim* tanpa memperhitungkan perubahan trim akibat pemasangan *Hull Vane*.

Oleh karena itu, kesimpulan tentang reduksi hambatan total dibatasi sebagai hasil simulasi kondisi satu fasa, bukan representasi penuh kondisi pelayaran nyata. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan model dua fasa (VOF) dan analisis transien.

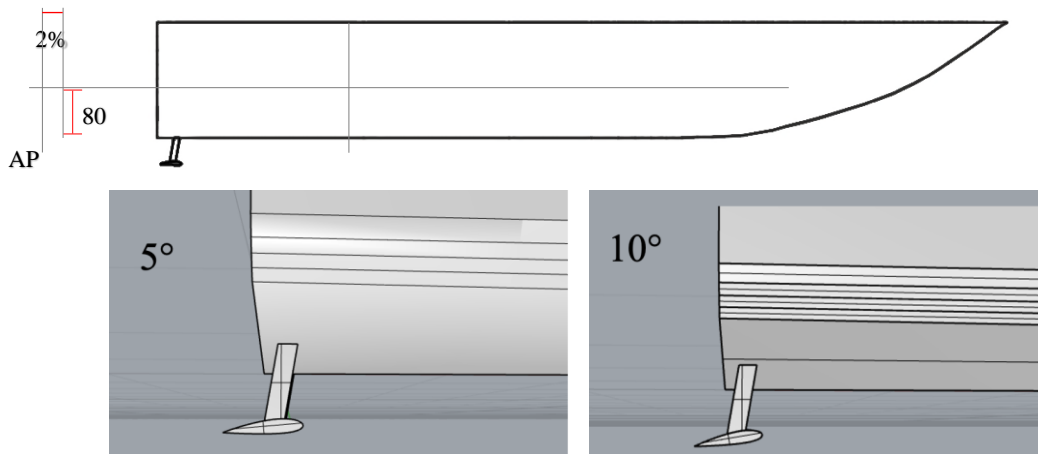
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan sejumlah parameter tetap yang meliputi ukuran utama kapal patroli, dimensi *Hull Vane*, tipe *foil*, serta posisi pemasangan *foil* di bawah lambung kapal. Pemilihan parameter tetap ini didasarkan pada kebutuhan operasional kapal patroli ukuran 14,1 m yang umum digunakan di perairan Indonesia, serta mengacu pada studi literatur terkait efektivitas *Hull Vane* pada kapal cepat. Dengan menetapkan parameter-parameter ini, pengaruh variasi sudut serang terhadap hambatan total dan pola aliran dapat dianalisis secara lebih akurat tanpa gangguan dari variabel lain yang tidak terkontrol.

Nilai LOA 14,10 m dan LWL 12,00 m menunjukkan kapal patroli ini termasuk kategori kapal cepat berukuran kecil dengan rasio panjang terhadap lebar (L/B) sekitar 4,4 yang cukup ramping untuk mencapai kecepatan 25 knot. Sarat (T) 0,75 m tergolong dangkal, sehingga kapal dapat beroperasi di perairan kepulauan yang cetek. *Span foil* 2,3 m dan *chord foil* 0,34 m menghasilkan rasio aspek sekitar 6,76 yang tergolong tinggi, sehingga *foil* mampu menghasilkan gaya angkat efisien dengan hambatan induksi kecil. Profil NACA 4418 dipilih karena memiliki *camber* sedang (4% dari *chord*) dan ketebalan maksimum 18% di bagian depan. Kombinasi ini memberikan keseimbangan antara gaya angkat tinggi pada kecepatan rendah dan ketahanan terhadap *stall* pada sudut serang besar. Profil ini juga banyak digunakan pada aplikasi *hydrofoil* dan *stabilizer* kapal karena kestabilan alirannya.

Posisi *Hull Vane* yaitu 2% LWL di belakang kapal dan 80% T di bawah sarat. Posisi longitudinal 2% LWL di belakang buritan dipilih agar *foil* berada tepat di aliran air yang meninggalkan lambung, sehingga memanfaatkan energi aliran berkecepatan tinggi. Kedalaman pemasangan 80% T di bawah garis air (sekitar 0,6 m) bertujuan memastikan *foil* selalu terendam meskipun kapal mengalami *heaving* atau *pitching*. Posisi ini juga menghindari gangguan gelombang buritan (*wake*) yang dapat mengurangi efektivitas *foil* jika dipasang terlalu dekat permukaan.



Gambar 9. Peletakan *Hull Vane foil* sudut 5° dan 10°
(Sumber: Hasil Olahan)

Gambar 9. memperlihatkan secara visual posisi *foil* terhadap lambung kapal. Terlihat bahwa *foil* dipasang di bagian buritan dengan sudut kemiringan tertentu terhadap garis horizontal. Posisi ini diharapkan dapat menangkap aliran air yang relatif seragam dan belum mengalami turbulensi berlebih dari baling-baling atau sirip kemudi. Konfigurasi geometris ini menjadi dasar untuk simulasi pada kedua variasi sudut serang (5° dan 10°) yang akan dibahas pada sub-bab berikutnya.

3.2. Validasi

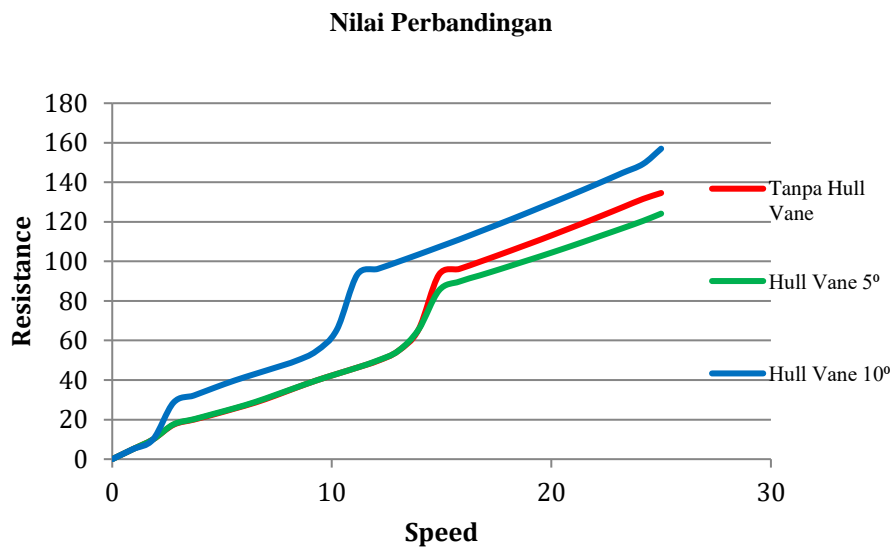
Validasi dilakukan dengan membandingkan hambatan model kapal tanpa *Hull Vane* terhadap rumus Holtrop-Mennen [10]. Karena rumus Holtrop-Mennen memprediksi hambatan pada **skala penuh**, maka hasil prediksi (131,2 N pada skala penuh) perlu diskalakan ke skala model menggunakan hukum kesamaan *Froude*. Setelah penskalaan, diperoleh nilai hambatan model sebesar 137,5 N. Hasil simulasi CFD model tanpa *Hull Vane* menghasilkan 134,59 N, sehingga deviasi terhadap Holtrop-Mennen yang telah diskalakan adalah 2,1% (< 3%). Dengan demikian, model CFD dinyatakan valid untuk digunakan dalam penelitian ini. Metode penskalaan mengacu pada prosedur ITTC 7.5-03-02-04 [1+L4-L9].

3.3. Hambatan Total

Hasil simulasi hambatan total untuk ketiga konfigurasi disajikan pada Tabel 5. Kapal tanpa *Hull Vane* menghasilkan hambatan 134,59 N pada kecepatan 25 knot. Nilai ini menjadi *baseline* untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan *Hull Vane* pada kedua variasi sudut serang.

Tabel 5. Hambatan total model (skala 1:5) untuk variasi sudut serang

Konfigurasi	Hambatan Total (N)	Reduksi (%)
Original	134,59	–
NACA 4418 sudut 5°	124,16	7,8
NACA 4418 sudut 10°	129,89	3,5



Gambar 10. Grafik perbandingan hambatan total variasi sudut NACA 4418 (Sumber: Hasil Olahan)

Hasil ini menunjukkan bahwa sudut serang menentukan efektivitas *Hull Vane* secara dramatis. Pada sudut 5°, terjadi reduksi signifikan sebesar 7,8% (menjadi 124,16 N), sedangkan pada sudut 10° hanya 3,5% (menjadi 129,89 N). Perbedaan lebih dari dua kali lipat ini memperkuat argumen bahwa terdapat sudut optimal yang tidak boleh dilampaui. Fenomena ini dijelaskan oleh mekanisme aliran: pada sudut 5°, aliran masih menempel (*attached flow*), sehingga gaya angkat optimal. Sebaliknya, pada sudut 10°, terjadi pemisahan aliran (*flow separation*) pada sisi hisap, yang menciptakan daerah resirkulasi dan meningkatkan tekanan hambat secara signifikan. Dengan demikian, reduksi yang lebih kecil pada sudut 10° bukan karena kurangnya gaya angkat, melainkan karena peningkatan tekanan hambat akibat separasi yang mengimbangi bahkan melampaui manfaat dorongan horizontal dari *foil*.

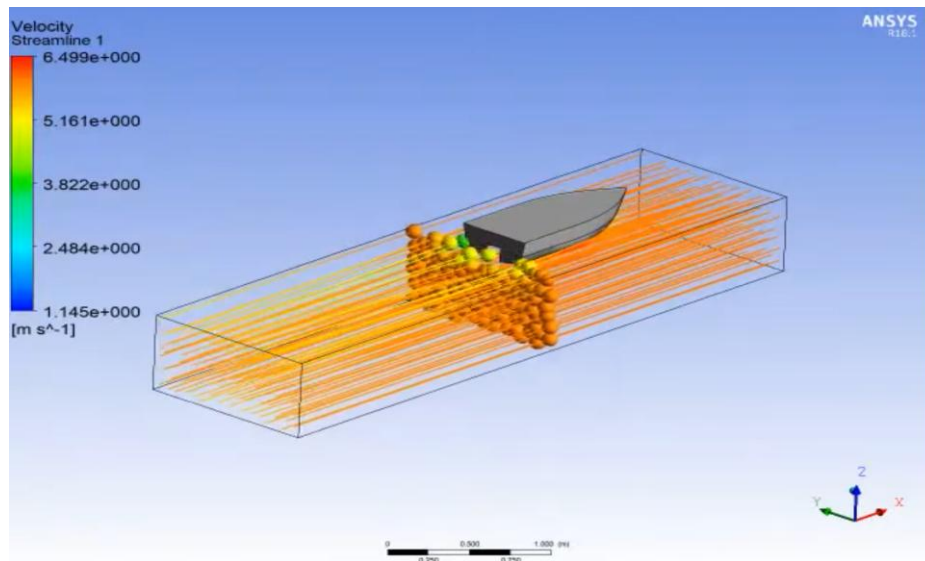
3.4. Tekanan pada Lambung Kapal

Distribusi tekanan pada lambung kapal diamati untuk memahami beban hidrodinamik. Tabel 6 menunjukkan nilai tekanan maksimum untuk kedua konfigurasi *Hull Vane*. Pada sudut 5°, tekanan maksimum tercatat 7.566,4 Pa, sedangkan pada sudut 10° mencapai 8.125,3 Pa. Tekanan yang lebih rendah pada sudut 5° mengindikasikan distribusi tekanan yang lebih merata dan berkurangnya daerah bertekanan tinggi yang berkontribusi terhadap hambatan tekanan.

Variasi Sudut	Tekanan Maksimum (Pa)
5°	7.566,4
10°	8.125,31

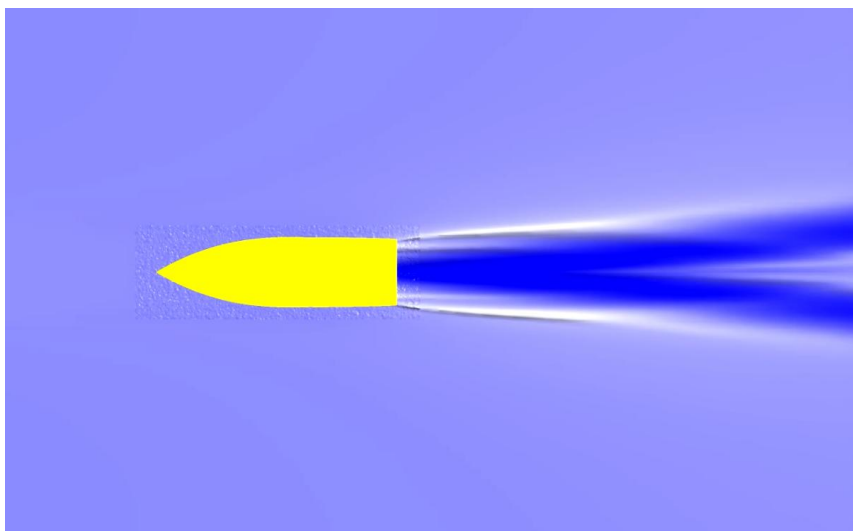
Berdasarkan data ini, dapat dijelaskan bahwa pada sudut 5°, aliran yang menempel menghasilkan distribusi tekanan yang lebih homogen di sepanjang permukaan *foil* dan lambung di sekitarnya. Sementara pada sudut 10°, konsentrasi tekanan tinggi terjadi pada bagian *leading edge* dan area stagnasi di belakang *foil*, yang mengindikasikan adanya separasi aliran. Hal ini konsisten dengan temuan Darmawansyah [2] bahwa variasi bentuk *Hull Vane* mempengaruhi tekanan pada lambung

3.5. Analisis Pola Aliran dan Separasi



Gambar 11. Streamline NACA 4418 dengan Sudut serang $\alpha = 5^\circ$
(Sumber: Hasil Olahan)

Pada sudut serang 5° (Gambar 11), *streamline* cenderung menempel sempurna (*attached flow*) di sepanjang permukaan atas dan bawah *airfoil*. Tidak terlihat adanya pusaran atau aliran balik yang signifikan. Kecepatan di permukaan atas lebih tinggi dibandingkan permukaan bawah, terlihat dari warna yang bergeser ke arah kuning/hijau di area punggung *airfoil*. Pola aliran yang menempel ini menghasilkan gaya angkat yang optimal tanpa disertai hambatan tekanan tambahan yang signifikan.



Gambar 12. Streamline NACA 4418 dengan Sudut serang $\alpha = 10^\circ$
(Sumber: Hasil Olahan)

Pada sudut serang 10° (Gambar 14), pola aliran menunjukkan gejala yang sangat berbeda. Sudut yang lebih curam menyebabkan peningkatan kurvatur efektif pada permukaan atas, yang pada gilirannya meningkatkan gradien tekanan adverse (*adverse pressure gradient*). Akibatnya, terjadi separasi aliran pada bagian belakang sisi hisap *foil*, yang ditandai dengan:

1. Adanya daerah resirkulasi (pusaran) di belakang *foil*
2. Garis *streamline* yang terputus dan tidak mengikuti kontur permukaan

3. Perubahan arah aliran yang mendadak (aliran balik)

Pola *streamline* terlihat bahwa kecepatan aliran tidak seragam. Daerah dengan kecepatan tertinggi (merah) mengindikasikan area dengan percepatan fluida yang signifikan, misalnya di sekitar bagian tertentu lambung kapal akibat sudut 5° . Sementara itu, garis arus yang rapat menunjukkan gradien kecepatan tinggi, yang berhubungan dengan gaya hambat dan distribusi tekanan. Pola aliran pada sudut serang 5° , *streamline* cenderung menempel sempurna (*attached flow*) di sepanjang permukaan atas (*upper surface*) dan bawah (*lower surface*) *airfoil*. Tidak terlihat adanya pusaran atau aliran balik yang signifikan. Kecepatan di permukaan atas lebih tinggi dibandingkan permukaan bawah. Hal ini terlihat dari warna yang bergeser ke arah kuning/hijau di area punggung *airfoil*. Sedangkan pola aliran pada sudut serang 10° yang lebih curam menyebabkan peningkatan kurvatur efektif pada permukaan atas.

3.6. Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Reduksi hambatan 7,8% yang dicapai dalam penelitian ini berada pada kisaran yang realistis untuk kapal patroli ukuran kecil dengan kecepatan 25 knot. Secara umum, nilai reduksi hambatan dari pemasangan *Hull Vane* bervariasi secara signifikan tergantung pada ukuran kapal, tipe *foil*, sudut serang, serta kondisi operasional. Semakin besar kapal dan semakin tinggi angka Froude, kecenderungan reduksi yang diperoleh juga semakin besar, karena *Hull Vane* bekerja lebih optimal pada kapal dengan hambatan gelombang yang dominan. Sebagai perbandingan:

Tabel 7. Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Peneliti	Kapal	Kecepatan	Reduksi
Uithof dkk. (2017)	Motor yacht 42 m	$F_n=0,44$	23%
Uithof dkk. (2020)	Patroli 50 m	8,6–34,4 knot	hingga 32,4%
Nugroho dkk. (2018)	Perintis 750 DWT	-	signifikan
Ra'uf dkk. (2025)	Patroli (umum)	kecepatan tinggi	bermakna
Penelitian ini	Patroli 14,1 m	25knot	7,8%

Perbedaan nilai reduksi terutama disebabkan oleh beberapa faktor:

1. Ukuran kapal yang lebih kecil (skala efek Reynolds): pada bilangan Reynolds yang lebih rendah, hambatan viskos menjadi komponen dominan karena luas permukaan basah relatif lebih besar dibandingkan volume kapal.
2. Perbedaan tipe *foil* dan sudut serang: NACA 4418 dengan *camber* 4% memiliki karakteristik gaya angkat yang berbeda dengan tipe NACA 2415 atau NACA 1410.
3. Metode simulasi: penelitian ini menggunakan simulasi satu fasa tanpa permukaan bebas, sementara studi Uithof dkk. menggunakan uji eksperimental.
4. Perbedaan kecepatan dan angka Froude: pada $F_n \approx 0,65$, kontribusi hambatan gelombang sangat signifikan dan tidak dapat diabaikan.

Pada kapal patroli 14,1 m, kontribusi hambatan viskos jauh lebih besar dibandingkan hambatan gelombang, sementara *Hull Vane* lebih efektif pada kapal dengan komponen hambatan gelombang yang signifikan [21]. Meskipun reduksi yang dicapai tidak setinggi studi pada kapal yang lebih besar, hal ini justru menunjukkan bahwa *Hull Vane* tetap memberikan manfaat nyata meskipun pada kapal kecil dengan karakteristik hambatan yang berbeda. Oleh karena itu, reduksi 7,8% pada penelitian ini tidak dapat dianggap rendah, melainkan cukup optimal mengingat keterbatasan ukuran kapal dan metode simulasi. Selain itu, penggunaan sudut 5° terbukti lebih unggul dibandingkan sudut 10° yang

menimbulkan separasi, sehingga temuan ini memberikan kontribusi praktis bagi perancang kapal patroli kecil di Indonesia.

3.7. Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi praktis:

1. Pemilihan tipe *foil* dan sudut serang yang tepat sangat krusial. Konfigurasi NACA 4418 dengan sudut 5° terbukti paling optimal di antara kedua variasi yang diuji untuk kapal patroli 14,1 m pada kecepatan 25 knot.
2. Pentingnya analisis sensitivitas sudut: peningkatan sudut dari 5° ke 10° pada tipe yang sama justru meningkatkan hambatan akibat separasi aliran. Hal ini mengingatkan bahwa desain *Hull Vane* harus disesuaikan dengan rentang operasi kapal.
3. Reduksi hambatan 7,8% berpotensi menurunkan kebutuhan daya propulsi dan konsumsi bahan bakar, namun besarnya penghematan aktual perlu dihitung lebih lanjut berdasarkan karakteristik mesin dan sistem propulsi kapal. Secara estimasi awal, dengan asumsi efisiensi propulsi konstan, reduksi daya yang dibutuhkan sebanding dengan reduksi hambatan, yaitu sekitar 7,8% pada sudut 5° .
4. Penelitian Ra'uf dkk. [13] juga menegaskan bahwa konfigurasi *Hull Vane* yang optimal dapat menjadi solusi *retrofit* yang praktis untuk meningkatkan performa kapal dan mengurangi konsumsi energi.

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi praktis. Pertama, pemilihan tipe *foil* dan sudut serang yang tepat sangat krusial. Konfigurasi NACA 4418 dengan sudut 5° terbukti paling optimal untuk kapal patroli 14,1 m pada kecepatan 25 knots. Kedua, pentingnya analisis sensitivitas sudut: peningkatan sudut dari 5° ke 10° pada tipe yang sama justru meningkatkan hambatan. Hal ini mengingatkan bahwa desain *Hull Vane* harus disesuaikan dengan rentang operasi kapal. Konfigurasi *Hull Vane* yang optimal dapat menjadi solusi retrofit yang praktis untuk meningkatkan performa kapal dan mengurangi konsumsi energi[13].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada model skala 1:5 dengan variasi sudut serang 5° dan 10° , dapat ditarik kesimpulan bahwa Konfigurasi sudut serang 5° memberikan reduksi hambatan terbesar di antara kedua variasi yang diuji, yaitu sebesar 7,8% (dari 134,59 N menjadi 124,16 N). Validasi dengan rumus Holtrop-Mennen yang telah diskalakan menunjukkan deviasi 2,1% ($< 3\%$). Tekanan maksimum pada lambung tercatat sebesar 7.566,4 Pa. Penurunan hambatan ini berpotensi menurunkan kebutuhan daya propulsi dan konsumsi bahan bakar secara signifikan. Sudut serang 10° hanya mampu menurunkan hambatan sebesar 3,5% (menjadi 129,89 N) dengan tekanan lambung yang lebih tinggi (8.125,3 Pa). Penurunan kinerja ini disebabkan oleh terjadinya separasi aliran pada sisi hisap *foil*, yang dibuktikan melalui analisis *streamline*, peningkatan *Turbulent Kinetic Energy* (TKE), dan penurunan tegangan geser dinding (*wall shear stress*) hingga mendekati nol pada bagian belakang *foil*. Pemilihan sudut serang yang tepat sangat menentukan efektivitas *Hull Vane*, karena sudut yang terlalu besar (10°) menyebabkan separasi dan penurunan kinerja, sementara sudut yang lebih kecil (5°) menjaga aliran tetap menempel dan menghasilkan gaya angkat optimal. Dengan demikian, *Hull Vane* NACA 4418 pada sudut serang 5° merupakan konfigurasi terbaik di antara dua variasi yang diuji untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamik kapal patroli ukuran 14,1 m pada kecepatan 25 *knot*.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memperhitungkan efek permukaan bebas sekaligus menangkap fenomena *unsteady flow* di belakang kapal cepat, serta memvariasikan posisi longitudinal *foil* dan menguji sudut serang yang lebih luas (0° , 3° , 7° , 12°) guna menganalisis pengaruhnya terhadap kinerja *Hull Vane* dan menemukan sudut optimal secara menyeluruh, yang kesemuanya divalidasi secara eksperimental melalui uji tarik skala laboratorium (*towing tank test*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Simulasi Teknik Perkapalan Politeknik Negeri Bengkalis atas fasilitas komputer dan lisensi perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 6th ed. New York: McGraw-Hill; 2017.
- [2] A. Darmawansyah, "Penerapan *Hull Vane* pada kapal patroli PAT MEDAN," Skripsi, Politeknik Negeri Bengkalis, Bengkalis, 2025.
- [3] S. Gopinath and R. Vijayakumar, "Computational analysis of the effect of *Hull Vane* on hydrodynamic performance of a medium-speed vessel," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 22, pp. 762–774, 2023.
- [4] E. Haryanto and B. Siswandi, "Dynamics study of proof jiggling ship due to changes in hull geometry," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1450, p. 012129, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1450/1/012129.
- [5] E. Haryanto, *Tahanan dan Propulsi Kapal*. Bengkalis, Indonesia: Politeknik Negeri Bengkalis, 2021.
- [6] E. Haryanto and Rosmauli, "Perubahan mesin penggerak utama kapal tugboat SJP 01 terhadap kecepatan kapal," *Inovtek Polbeng: J. Inovasi Teknol. Politeknik Negeri Bengkalis*, vol. 14, no. 2, pp. 1–9, Nov. 2024. DOI: 10.35314/ye624c91.
- [7] ITTC, "ITTC recommended procedures and guidelines: Practical guidelines for ship CFD applications," in *Proc. 28th ITTC*, 2017.
- [8] W. Maheswara, U. Budiarto, and A. F. Zakki, "Analisa pengaruh *Hull Vane* tipe NACA 4412 sudut 10° terhadap hambatan dan seakeeping pada kapal perintis 750 DWT," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 2, pp. 1–9, 2019.
- [9] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [10] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2021.
- [11] NACA 4418 airfoil coordinates, *Airfoil Tools*. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4418-il>. [Accessed: May 20, 2026].
- [12] A. S. Nugroho, E. S. Hadi, and P. Manik, "Analisa pengaruh penambahan *Hull Vane* tipe NACA 2415 sudut 5° pada kapal perintis 750 DWT," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [13] M. I. S. A. Ra'uf, I. M. Kamal, N. A. Othman, and Y. A. Ahmed, "Computational investigation of *Hull Vane* effects on resistance and propulsive performance of a patrol vessel," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 8, p. 1507, 2025.
- [14] D. M. Sihombing, "Analisa pengaruh penambahan *Hull Vane* terhadap hambatan kapal perintis 750 DWT," Skripsi, Universitas Diponegoro, Semarang, 2017.
- [15] G. C. Soma and R. Vijayakumar, "Numerical investigation on the effect of *Hull Vane* for a high-speed displacement vessel," *Ships Offshore Struct.*, vol. 19, no. 9, pp. 1277–1290, 2024.

- [16] K. Suastika, A. S. Saputra, A. F. Fauzi, and A. Firdhaus, "Comparison of performance of straight- and V-shaped vanes applied as energy saving device to high-speed boats," *CFD Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 110–122, 2023.
- [17] A. Supriyonggo, "Studi eksperimen pengaruh posisi *Hull Vane* terhadap hambatan kapal perintis 750 DWT," Skripsi, Universitas Diponegoro, Semarang, 2018.
- [18] A. Trimulyono, W. Ananda, K. Kiryanto, and A. W. Santosa, "Investigation of the effect hullvane and bow foil on flat-hull ship using CFD approach," *IPTEK J. Proc. Ser.*, vol. 9, no. 1, pp. 45–52, 2023.
- [19] K. Uithof, B. Bouckaert, P. van Oossanen, and N. Moerke, "An update on the development of the *Hull Vane*®," in *Proc. 13th Int. Conf. Fast Sea Transp. (FAST 2015)*, Washington, DC, 2016.
- [20] K. Uithof, P. van Oossanen, N. Moerke, and B. Bouckaert, "Hull Vane on a 42 m motor yacht," *Int. J. Small Craft Technol.*, vol. 159, no. B2, pp. 31–44, 2017.
- [21] K. Uithof, P. van Oossanen, N. Moerke, and J. van der Vlies, "Hull Vane on a 50 m patrol vessel," in *Proc. Warship 2020: Future Surface Vessels*, London, UK, 2020.