



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Analisis Pengaruh Penambahan *Spray Strips* pada *Stepped Planing Hull* terhadap Hambatan Total menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics*

Febriyansyah Eko Ardhi Nugroho<sup>1)</sup>, Untung Budiarto<sup>1)</sup>, Ari Wibawa Budi Santosa<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Laboratorium Hidrodinamika

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

<sup>\*)</sup>e-mail : febri13@students.undip.ac.id

### Abstrak

Kapal tipe planing hull menghasilkan tekanan hidrodinamika yang besar ketika sedang melaju dalam kecepatan tinggi. Meningkatkan kecepatan kapal menjadi salah satu aspek penting dari desain planing hull. Pada penelitian ini menggunakan spray strips untuk mengurangi hambatan yang dihasilkan kapal planing hull. Spray strips ini berfungsi untuk mengurangi Wetted Surface Area (WSA), terutama pada area semprotan. Cara kerjanya dengan membelokkan arah aliran semprotan yang terdapat di depan garis stagnasi. Penelitian ini menggunakan model double stepped hull dan variasi besar bottom angle ( $\delta$ ) pada spray strips, serta kecepatan kapal. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Finite Volume Method (FVM) dengan persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Model turbulensi yang digunakan  $k-\omega$  SST dan untuk merepresentasikan fase air dan udara menggunakan Volume of Fluid (VOF). Hasil dari penelitian ini menunjukkan penambahan spray strips secara keseluruhan dapat mengurangi hambatan total di semua kecepatan. Semakin besar bottom angle ( $\delta$ ) maka semakin kecil hambatan total yang dihasilkan. Dengan pengurangan terbesar 14.96% pada variasi besar sudut  $60^\circ$  (SS 5) di  $Fn$  1.41. Sedangkan, penurunan hambatan total terkecil sebesar 2.8% di  $Fn$  2.07 pada variasi besar sudut  $15^\circ$  (SS 2). Berdasarkan rata-rata pengurangan hambatan total di semua kecepatan, variasi SS 5 menunjukkan hasil terbaik.

Kata Kunci : planing hull, hambatan, spray strips, CFD

### 1. PENDAHULUAN

Planing hull biasanya digunakan pada kapal cepat (*high-speed vessel*) untuk meningkatkan kecepatannya yang mana *planing hull* akan menghasilkan tekanan hidrodinamika tinggi dalam kecepatan tinggi untuk mengurangi hambatan gesekan dan hambatan gelombang[1]. Ketika kapal melaju dengan kecepatan tinggi, bilangan Froude biasanya didasarkan pada elemen panjang  $Fr > 0,4$  ( $Fr = Vs/Lg$ )[2].

Meningkatkan kecepatan kapal adalah salah satu aspek penting dari desain *planing hull*, namun yang menjadi masalah yaitu hambatan yang dihasilkan. Untuk mengurangi hambatan dengan membiarkan air terpisah dari lambung kapal pada kecepatan tinggi *planing hull* biasanya menggunakan lambung *hard-chine*[2]. Pada kecepatan tinggi, *hard-chine* pada lambung kapal dirancang untuk menghasilkan tekanan dasar

dinamis yang positif. Tekanan positif ini mengangkat lambung kapal, mengurangi komponen penopang lambung kapal yang mengapung. Akibatnya, saat perencanaan, area dasar yang dibasahi secara signifikan lebih kecil daripada area yang dibasahi secara statis[3].

Selain menggunakan lambung *hard chine*, terdapat modifikasi bentuk lambung salah satunya yaitu *stepped planing hull*. *Step hulls* di lambung kapal memisahkan aliran dan menciptakan rongga udara[4]. Pemisahan aliran dan pembentukan rongga udara yang disebabkan oleh undakan mengurangi permukaan yang dibasahi, rasio hambatan terhadap gaya angkat, dan distribusi tekanan yang seragam pada bagian bawah lambung kapal *stepped planing hulls*[5]. Peletakan *step hull* berguna untuk menghisap udara dengan menyediakan lubang lebar di sisi bawah lambung. *Step hull* sering kali dapat meningkatkan kecepatan

antara kapal yang menggunakan *step hull* dan yang tidak menggunakan *step hull* sekitar 10% hingga 15% ketika tenaga disediakan oleh mesin yang sama[6].

Salah satu cara untuk mengurangi hambatan pada kapal *planing hull* yaitu dengan penambahan *spray strips*. *Spray Strips* ini berfungsi untuk mengurangi luas permukaan yang terkena air (WSA), terutama pada area semprotan. Cara kerjanya dengan membelokkan aliran semprotan terdapat di depan garis stagnasi[7].

Pada penelitian Clement, *spray-strips* dapat mengurangi maksimum pada resistensi kecepatan tinggi sebesar 6 %, tanpa peningkatan resistensi pada kecepatan rendah[8]. Penelitian Samuel et al. menjelaskan penambahan *spray strips* dapat mengurangi hambatan total kapal terbesar yaitu 6% [9]. Menurut Seo et al. (2016) *spray rails* tidak memiliki efek negatif pada kinerja ketahanan lambung kapal, sementara secara efektif menstabilkan kapal di air tenang dan bergelombang[10]. Pada penelitian Molchanov et al. (2019) *spray rails* menghasilkan pengurangan hambatan hingga 9% dan hanya mempengaruhi daya angkat model. Konfigurasi *deflektor* menghasilkan pengurangan hambatan yang lebih tinggi lagi, mulai dari 10% hingga 25% tetapi *trim* dinamis lambung kapal berbeda[11]. Penelitian Wielgosz et al. (2020) *spray deflektor* ternyata menurunkan *trim* kapal sekitar 20% dibandingkan dengan kapal tanpa *spray deflektor* untuk kasus beban yang sama[12]. Kemudian Muhammad (2009) melakukan eksperimen tentang pengaruh *spray strakes* terhadap manuver kapal. Dan peletakan *spray strakes* untuk hasil yang optimal yaitu pada *stagnation line* ke ujung haluan[13]. Castaldi et al. (2021) melakukan uji coba mengenai *deflector* mengurangi hambatan hingga 5% dengan pengurangan tertinggi yang dicapai ketika garis stagnasi melintasi *deflector* sekitar seperempat balok dari *chine* [14].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penelitian ini akan membahas pengaruh dari penambahan *spray strips* pada lambung kapal *stepped hull*. Dengan variasi modifikasi bentuk profil dan besar sudut *spray strips*, serta kecepatan kapal. Diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan efek yang signifikan terhadap kondisi kapal.

## 2. METODE

Pada penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh dari *spray strips* yang ditambahkan pada kapal *double stepped planing hull* terhadap nilai hambatan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Analisis dilakukan dalam keadaan air tenang (*calm water*).

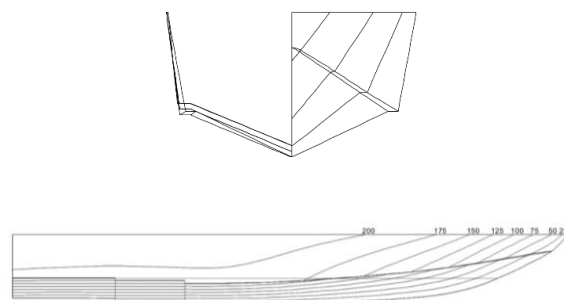
Dilakukan validasi terhadap hasil hambatan dengan penelitian terdahulu.

### 2.1. Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan model kapal *Double Stepped Planing Hull* diperoleh dari penelitian dari Taunton, et. al. yang menggunakan metode eksperimen [15]. Model kapal menggunakan skala 1:7.5 dari ukuran kapal asli. Data ukuran utama model kapal C2 dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Ukuran Utama Model C2

No	Dimensi	Nilai	Unit
1)	<i>Length</i> (L)	2	m
2)	<i>Breadth</i> (B)	0,399	m
3)	<i>Draft</i> (T)	0,096	m
4)	<i>Scale</i> ( $\lambda$ )	1/7,5	-
5)	<i>Displacement</i> ( $\Delta$ )	24,8	kg
6)	<i>Deadrise</i> ( $\beta$ )	22,5	°
7)	LCG	0,33	%



Gambar 1. Linesplan model C2

### 2.2. Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan parameter dengan menggunakan model kapal C2 yaitu *double stepped planing hull* dan penambahan *spray strips*. Parameter tetap pada penelitian ini mencakup ukuran utama meliputi: panjang kapal, lebar kapal, sarat kapal,  $C_b$  kapal, L/B kapal, LCG kapal. Sedangkan untuk parameter peubah, yaitu bentuk profil, dan besar sudut *spray strips* serta kecepatan kapal.

### 2.3. Pemodelan Kapal

Pembuatan model 3D *double stepped hull* yaitu dengan *software* Rhinoceros 7.0 dan dilakukan pengecekan model 3D. Pengecekan bertujuan untuk memastikan model tersebut tidak bocor dan sudah *closed surface*. Kemudian dapat dilakukan simulasi di *software* Star-CCM+. Pada Gambar 2 merupakan 3D model kapal tanpa variasi *spray strips*.



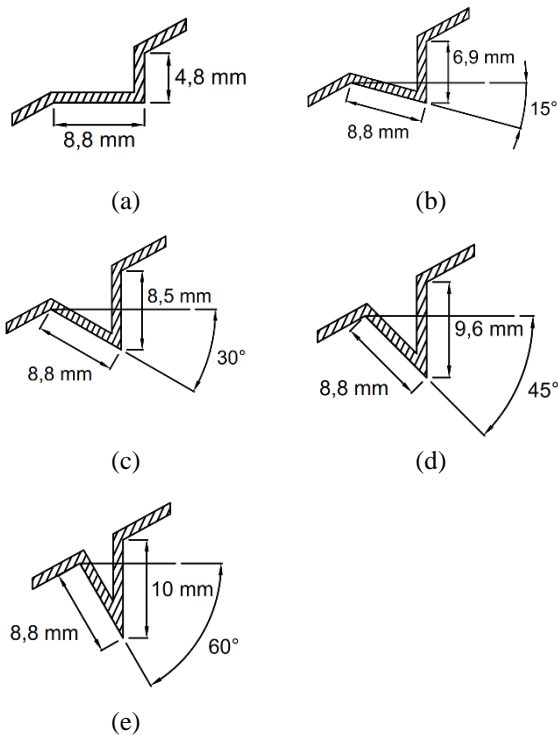
Gambar 2. Model C2

## 2.4. Variasi Model Kapal

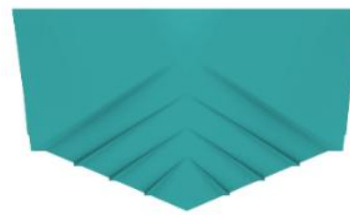
Konfigurasi profil SS (variasi *spray strips*) pada penelitian ini untuk variasi SS 1 berdasarkan konvensional profil dari penelitian Clement[8]. Kemudian  $b_{sr}$  merupakan lebar dari *spray strips* dengan nilai  $b_{sr} = 0.005L_{WL}$  seperti penelitian Savitsky et al. (2007)[16], lalu  $h$  untuk ketinggian dari *spray strips*. Variasi besar sudut ( $\delta$ ) profil *spray strips* berdasarkan dari penelitian Muller-Graf, profil ini variabel yang diubah adalah *bottom angle* ( $\delta$ ), dimana nilai ( $\delta$ )  $< 0^\circ$ [17].

Tabel 2. Variasi *spray strips* dan kecepatan kapal

Parameter Peubah	Variabel
Variasi profil	SS 1, SS 2, SS 3, SS 4, SS 5
<i>Froude number</i>	0.31, 0.62, 0.93, 1.24, 1.55
Total variasi	25



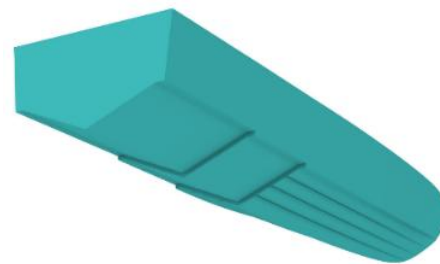
Gambar 3. Sketsa variasi *spray strips*: (a) SS 1; (b) SS 2; (c) SS 3; (d) SS 4; (e) SS 5



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Detail 3D variasi *spray strips*; (a) *front view*; (b) *side view*; (c) *perspective view*

## 2.5. Komputasi Numerik

Simulasi CFD dalam *software* Star-CCM+ menggunakan *Finite Volume Method* (FVM). Dimana FVM dapat menyelesaikan aliran yang lebih kompleks dapat ditangani secara numerik tanpa perkiraan tambahan seperti simulasi hidrodinamika kapal. *Solver* digunakan dalam metode *RANS* pada rangkaian persamaan yang menyatakan kontinuitas massa dan NS dengan menggunakan metode rata-rata waktu *Reynolds*. Pada sebagian besar aplikasi hidrodinamika, persamaan *RANS* dapat direpresentasikan sebagai aliran *incompressible* dengan cara berikut:

$$\nabla \cdot V = 0$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla P + \mu \Delta V + \nabla \cdot T_{RE} + S_M \quad (1)$$

Di mana  $V$  adalah vektor kecepatan aliran rata-rata *Reynolds*,  $P$  adalah medan tekanan rata-rata,  $\mu$  adalah viskositas dinamis,  $T_{Re}$  adalah tensor tekanan *Reynolds* dan  $S_M$  adalah vektor sumber momentum. Komponen  $T_{Re}$  dihitung dengan menggunakan model turbulensi yang dipilih.

$$\tau_{ij}^{12} = \mu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2)$$

Di mana  $\mu_t$  adalah viskositas turbulen,  $k$  adalah energi kinetik turbulen[18]. Sesuai dengan

pedoman ITTC, penelitian ini menggunakan model  $k-\omega$  SST, salah satu model turbulensi RANS [19]. Model turbulensi ini merupakan gabungan dari model  $k-\varepsilon$  dan model  $k-\omega$ ; model ini menyelesaikan model  $k-\varepsilon$  pada aliran massal dan juga turbulensi pada dinding berdasarkan model  $k-\omega$ .

Simulasi numerik yang dilakukan untuk memprediksi hasil hambatan kapal memerlukan pembuatan *computational domain*. Menurut standar ITTC (*International Towing Tank Conference*), perhitungan komputasi numerik memerlukan *virtual towing tank* yang digunakan sebagai *background domain*. Penelitian ini juga menggunakan metode *overset mesh*, yaitu metode yang menggunakan dua bagian *mesh*. Yang pertama untuk bagian yang bergerak (kapal) dan yang kedua sebagai *background* yang tidak bergerak. Pada Tabel 3 merupakan ukuran *domain* komputasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3. Ukuran Domain Komputasi

Parameter	Background	Overset
Length (m)	1 L from FP	0.2L from FP
	2.5 L from AP	0.2L from AP
Height (m)	1 L from deck	0.75H from H
	2 L from keel	0.75H from keel
Breadth (m)	1.5 L from symmetry	1B from symmetry

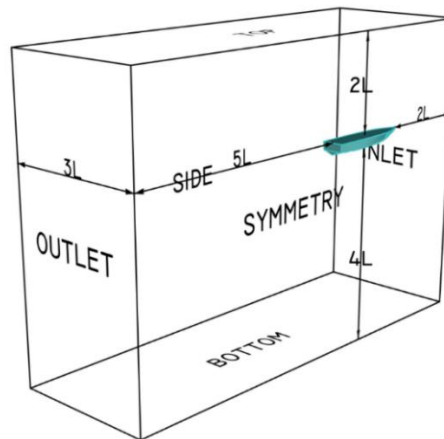
Kemudian kondisi batas komputasi juga didefinisikan sesuai seperti kondisi nyata. Oleh karena itu *virtual towing tank* akan dibagi menjadi beberapa bagian seperti Tabel 4.

Tabel 4. Boundary Condition

Parameter	Boundary	Type
Background	Top	Velocity inlet
	Bottom	Velocity inlet
	Side	Velocity inlet
	Inlet	Velocity inlet
	Outlet	Pressure outlet
	Symmetry	Symmetry plane
Overset	Block surface	Overset mesh
	Hull	No-slip wall
	Symmetry	Symmetry plane

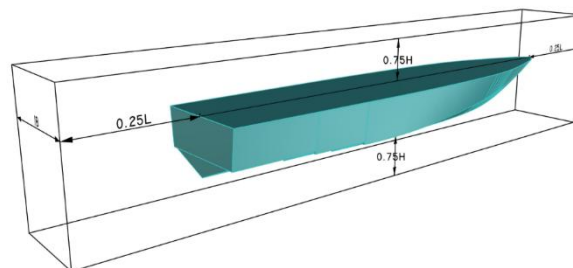
Dimensi domain komputasi ditampilkan pada Gambar 16, dengan panjang 1L dari FP dan 2.5L dari AP serta tinggi 1L dari H dan 2L dari Keel. Kondisi batas setiap domain pengumpanan harus ditentukan sesuai dengan keadaan fisik. Karena fluida masuk pada titik-titik ini, maka blok depan, atas, samping, dan bawah model kapal ditetapkan sebagai *velocity inlet*. Karena model ini

menggunakan simulasi setengah badan kapal, maka blok yang sesuai dengan garis tengah kapal dibuat menjadi *symmetry plane* untuk mendefinisikan bahwa sisi kiri dan kanan model sama. Karena blok belakang adalah tempat saluran keluar tekanan berada, maka dikonfigurasi seperti itu.



Gambar 5. Computational Domain

*Overset mesh* pada penelitian ini digunakan untuk simulasi model kapal dengan gerakan kompleks yakni *trim* dan *heave* (*sinkage*) dalam *computational fluid dynamics* (CFD). Dalam Simcenter STAR-CCM+, kita dapat menghasilkan mesh di sekitar model kapal dan memindahkannya relatif terhadap *mesh background* tanpa khawatir tentang *mesh* yang saling terhubung atau distorsi *cell*.



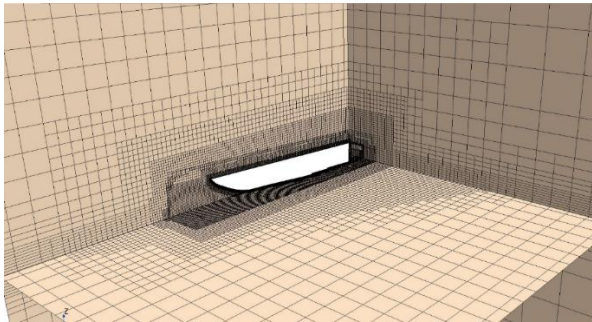
Gambar 6. Overset

Gambar 6 merupakan detail dari domain *overset* yaitu dengan panjang 0.2L dari FP dan 0.2L dari AP, tinggi 0.75H dari *deck* dan 0.75H dari *keel*, dan lebar 1B dari permukaan *symmetry*. Pembuatan *overset* ini sendiri digunakan untuk menganalisis gerakan yang terjadi pada badan kapal, karena hal itu penentuan dimensi *overset* harus menjangkau seluruh bagian dari badan kapal yang akan disimulasikan.

Terjadinya *numerical ventilation problem* (NVP) merupakan hal yang umum terjadi dalam simulasi *planing hull*. Hal ini disebabkan oleh adanya aliran udara atau pencampuran di sepanjang lambung kapal yang menyebabkan pengukuran hambatan total yang tidak akurat. Untuk mengatasi



NVP dilakukan metode *mesh refinement* yaitu memperbanyak atau merapatkan jumlah *mesh* pada *hull* dengan cara *mesh* yang lebih rapat diatur didekat haluan, buritan, area di dekat lambung, dan *free surface* [18].

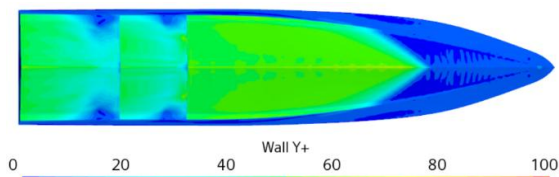


Gambar 7. Visualisasi *Mesh Refinement*

Celah antara air dan udara pada permukaan yang tenang dikenal sebagai *free surface*. Dengan pendekatan *Volume of Fluid* (VOF), posisi *free surface* dengan bentuk gelombang datar dapat direpresentasikan. Karena fase fluida dalam domain diasumsikan memiliki kecepatan, tekanan, dan temperatur yang sama, model VOF menggunakan asumsi persamaan dasar yang digunakan untuk menyelesaikan masalah fase tunggal.

Parameter yang memastikan keakuratan CFD adalah  $y^+$ , atau *wall function*. Nilai  $y^+$  digunakan untuk merepresentasikan fenomena *boundary layer* dalam unit tanpa dimensi. Menurut ITTC,  $y^+$  harus diberi nilai antara  $30 < y^+ < 100$  [19]. Penelitian ini nilai  $y^+$  yang digunakan yaitu 40.

$$\frac{y}{L} + \frac{y^+}{Re \sqrt{\frac{C_f}{2}}} \quad (3)$$



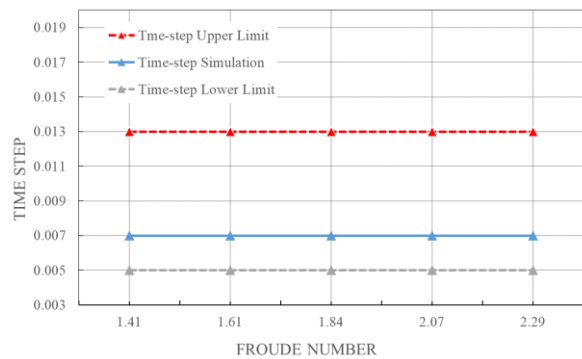
Gambar 8. Visualisasi *Wall Y+*

Aliran tidak stabil disimulasikan dengan menggunakan *time step*. Durasi setiap iterasi komputasi dikenal sebagai *time step*. Kecepatan kapal mempengaruhi penentuan *time step* perhitungan CFD. *Time step* yang digunakan lebih kecil untuk kapal yang lebih cepat.

$$\Delta t_{ITTC} = 0.005 \sim 0.01 \frac{L}{U} \quad (4)$$

Dimana  $L$  merupakan panjang kapal dan  $U$  adalah kecepatan kapal. Penentuan nilai *time step* pada penelitian ini berdasarkan ITTC

(*International Towing Tank Conference*) yaitu 0.007s disemua kecepatan sesuai dengan rekomendasi antara 0.005s – 0.0013s [19].



Gambar 9. *Time-Step*

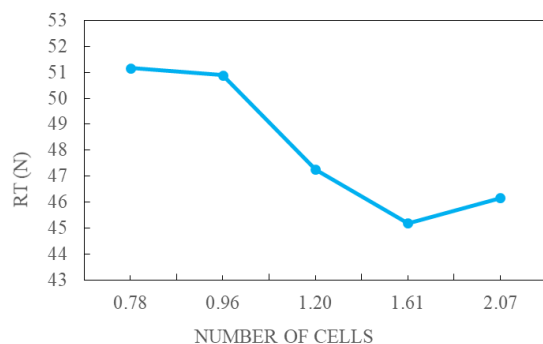
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. *Grid Independence*

Proses pemilihan ukuran *mesh* yang ideal untuk setiap simulasi yaitu *grid independence study*. Penelitian ini juga memeriksa nilai hambatan, *trim*, dan *heave* kapal dalam kaitannya dengan lima ukuran *mesh* yang berbeda. Adapun variasi *grid* yang digunakan seperti Tabel 5.

Tabel 5. Data *Grid Independence*

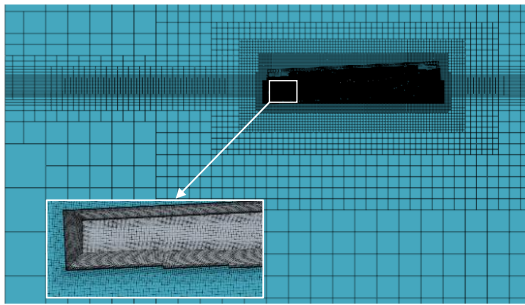
Type	Base Size	Cell (million)	Rt (N)	Diff (%)
Very Coarse	0.115	0.78	51.16	-
Coarse	0.105	0.96	50.89	-0.53
<u>Medium</u>	<u>0.095</u>	<u>1.20</u>	<u>47.26</u>	<u>-7.13</u>
Fine	0.085	1.61	45.19	-4.40
Very Fine	0.075	2.07	46.16	2.16



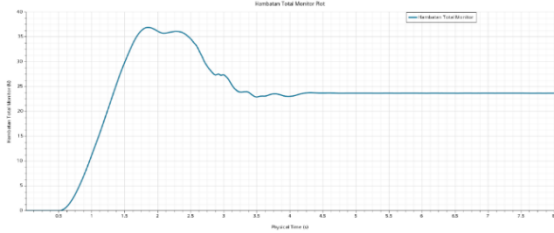
Gambar 10. Grafik *Grid Study*

Hasil dari variasi *grid* menunjukkan bahwa nilai hambatan keseluruhan merupakan faktor penentu yang mendekati konvergensi dengan semakin kecilnya ukuran *mesh* atau semakin besarnya jumlah *cell* yang digunakan. Perbedaan nilai hambatan total kapal cukup kecil dan

menunjukkan stabilitas ketika konvergensi bergerak dari ukuran *medium grid* ke *fine grid*.



Gambar 11. Visualisasi *medium grid*



Gambar 12. Grafik Korvergen Hambatan Total

Selain melakukan verifikasi menggunakan *grid independence*, penelitian ini juga melihat grafik korvergen sebagai parameter keberhasilan simulasi. Dimana keberhasilan simulasi dilihat dari kestabilan nilai yang dihasilkan oleh grafik pada setiap iterasi sampai pada waktu yang telah

ditentukan. Gambar 12 merupakan salah satu hasil grafik konvergen setelah dilakukan simulasi dengan *grid medium*, yaitu pada *barehull* dengan  $Fn$  1.41.

### 3.2. Validasi

Penelitian ini menggunakan validasi dengan cara membandingkan hasil simulasi numerik dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh Taunton, et. al. [15]. Metode ini dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik yang diterapkan memiliki akurasi yang baik. Penelitian ini akan memvalidasi tiga (3) kriteria, yaitu hambatan total ( $R_T$ ), *trim* ( $\tau$ ), dan *heave* ( $Z$ ) pada kondisi air tenang. Validasi yang dilakukan mencakup beberapa variasi kecepatan, yaitu  $Fn$  1.41, 1.61, 1.84, 2.07, dan 2.29. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *error* yaitu sebagai berikut:

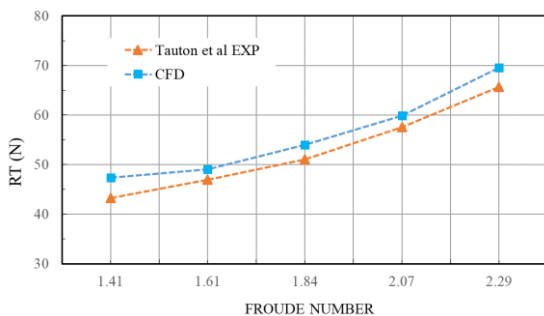
$$Error \psi(\%) = \left| \frac{\psi_{num} - \psi_{exp}}{\psi_{exp}} \right| \times 100 \quad (11)$$

Dimana  $\psi$  sebagai data parameter yang dihitung dalam simulasi, num sebagai simulasi CFD, dan exp sebagai eksperimen. Data hasil eksperimen dan simulasi CFD ditunjukkan pada Tabel 6 dibawah.

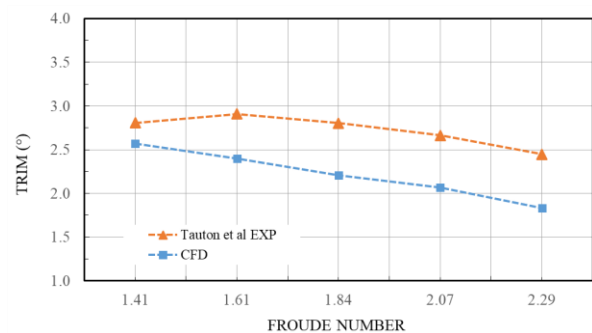
Tabel 6. Data Eksperimen dan Simulasi

Fn	Eksperimen			Simulasi CFD			Korksi (%)		
	$R_T$	$\tau^\circ$	Z	$R_T$	$\tau^\circ$	Z	$R_T$	$\tau^\circ$	Z
1.41	43.26	2.57	0.04	47.32	2.81	0.03	9.39	9.20	22.35
1.61	46.89	2.40	0.04	49.04	2.91	0.04	4.58	21.18	9.08
1.84	51.01	2.21	0.04	53.99	2.81	0.05	5.85	26.95	16.49
2.07	57.52	2.07	0.05	57.52	2.67	0.05	0.00	28.79	3.24
2.29	65.62	1.83	0.05	69.54	2.45	0.05	5.97	33.81	7.15

Nilai koreksi hambatan dari hasil simulasi CFD memiliki nilai *error* < 10% seperti pada penelitian Bakhtiar, et. al. [20]. Pola dari grafik hambatan simulasi CFD mirip dengan grafik hambatan eksperimen seperti pada Gambar 13 dengan nilai *error* tertinggi pada  $Fn$  1.41 yaitu sebesar 9.39%.



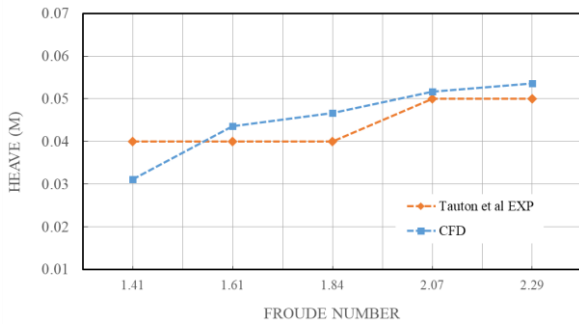
Gambar 13. Grafik Hambatan Total Eksperimen dan CFD



Gambar 14. Grafik *Trim* Eksperimen dan CFD

Untuk nilai *trim* pada  $Fn$  1.61-2.29 memiliki *error* >10% yang mana untuk nilai *error* paling baik di  $Fn$  1.41 sebesar 9.20 %. Untuk nilai *heave* pada  $Fn$  1.61, 2.07, 2.29 memiliki nilai *error* tidak lebih dari 10%, namun pada  $Fn$  1.4 dan 1.61 memiliki nilai *error* >10%. Pada pola grafik *trim* dan *heave* antara simulasi CFD dan eksperimen

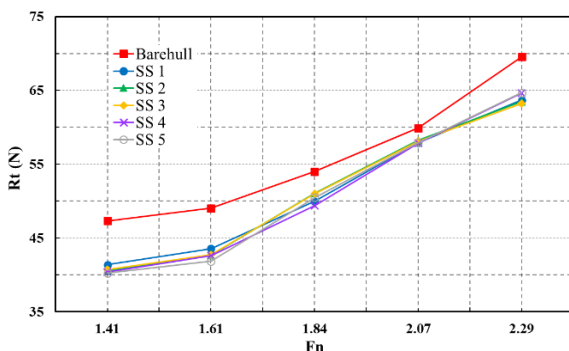
cenderung tidak jauh berbeda atau mirip untuk validasi seperti pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 15. Grafik *Heave* Eksperimen dan CFD

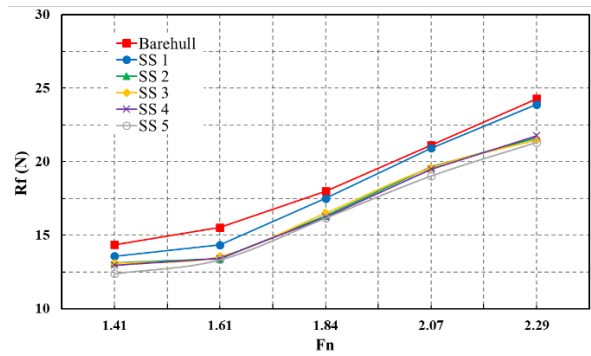
### 3.3. Analisis Variasi

Hambatan total pada kapal pada penelitian ini mencakup hambatan gesek (shear) dan hambatan residu (pressure). Untuk hambatan residu sendiri merupakan hambatan sisa dari hambatan total dikurangi hambatan gesek (tangensial). Selain itu, hambatan total pada planing hull juga dipengaruhi gaya lain, seperti trim dan heave pada kapal yang dihasilkan oleh karakteristik hidrodinamika pada fase planing. Berdasarkan simulasi numerik (CFD) yang telah dilakukan, dapat dilihat pada Gambar 16 merupakan grafik perbandingan nilai hambatan total antara barehull dan setiap variasi.



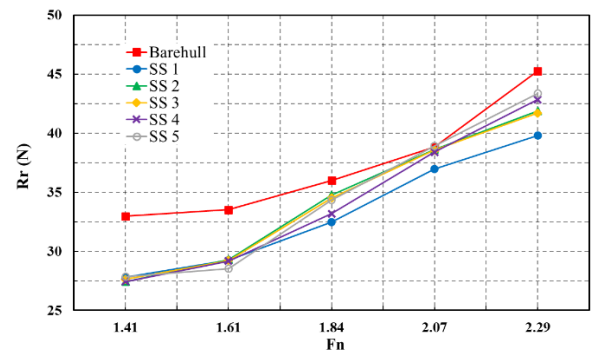
Gambar 16. Grafik hambatan total pada semua variasi

Data perhitungan tersebut menunjukkan bahwa pemasangan *spray strips* terjadi perubahan hambatan total kapal di setiap variasi dan kecepatan. Pada variasi SS 1 terjadi penurunan hambatan total terbesar pada Fn 1.41 yaitu sebesar 12.59%. Untuk variasi SS 2 terjadi penurunan hambatan total terbesar pada Fn 1.41 sebesar 14.35%. Untuk variasi SS 3 terjadi penurunan hambatan total terbesar pada Fn 1.41 sebesar 14%. Variasi profil *spray strips* SS 4 mengalami penurunan hambatan terbesar pada Fn 1.41 sebesar 14.65%, sedangkan untuk SS 5 mengalami penurunan hambatan pada Fn 1.41 sebesar 14.96%.



Gambar 17. Grafik Hambatan Gesek pada Semua Variasi

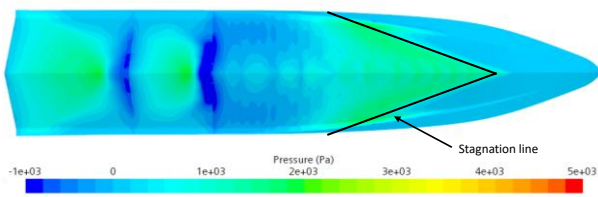
Penambahan *spray strips* juga berpengaruh terhadap nilai hambatan gesek. Gambar 17 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan kapal maka hambatan gesek juga semakin besar. Untuk pengurangan nilai hambatan gesek terbesar terjadi pada Fn 1.61 variasi SS 5 sebesar 14.12% dan pengurangan nilai hambatan gesek terkecil pada Fn 2.07 variasi SS 5 sebesar 1.01%. Namun dapat dilihat juga terdapat grafik yang menunjukkan terjadinya penambahan hambatan gesek. Dimana penambahan hambatan gesek terbesar pada Fn 2.07 variasi SS 1 sebesar 8.9%.



Gambar 18. Grafik Hambatan Residu pada Semua Variasi

Penambahan *spray strips* juga memiliki pengaruh terhadap hambatan residu sama halnya hambatan total dan hambatan gesek. Gambar 23 menunjukkan hambatan residu mengalami penurunan. Dimana penurunan hambatan residu paling besar terjadi pada Fn 1.41 variasi SS 2 sebesar 16.89% dan penurunan hambatan residu paling kecil pada Fn 1.84 variasi SS 2 sebesar 3.49%. Namun juga terjadi penambahan nilai hambatan residu terbesar pada Fn 2.07 variasi SS 5 sebesar 1.62%. Setiap nilai angka *Froude number* (Fn), terdapat garis stagnasi pada lambung kapal yang berbeda. Batas lambung kapal yang terendam dikenal sebagai garis stagnasi yaitu area tekanan terletak di belakangnya dan *spray area* terletak di depannya [9]. Posisi garis stagnasi memiliki nilai tekanan tinggi seperti pada Gambar 19. Sedangkan

untuk *spray area* yang terbentuk seperti pada Gambar 20.

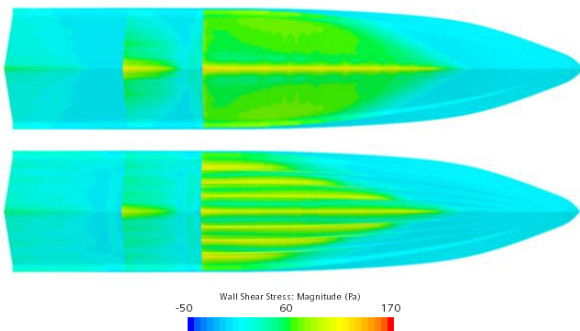


Gambar 19. Visualisasi *pressure barehull* pada Fn 1.41



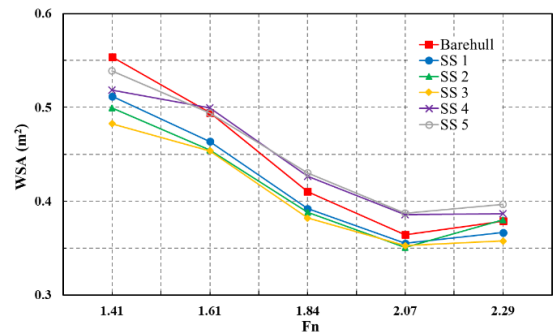
Gambar 20. Visualisasi *spray area barehull* pada Fn 1.41

*Wall Shear Stress Distribution* pada planing hull mengacu pada pola distribusi tegangan geser sepanjang permukaan lambung yang melaju di permukaan air. Tegangan geser pada dinding (*wall shear stress*) merupakan hasil interaksi antara air dengan permukaan lambung kapal yang dipengaruhi oleh kecepatan kapal, bentuk lambung kapal dan karakteristik arus di sekitarnya. Terlihat bahwa kontur pada variasi SS 5 memiliki warna hijau ke kuning yang lebih sedikit dibanding *barehull* menandakan bahwa distribusi *shear* tereduksi sehingga hambatan gesek yang dihasilkan lebih kecil.

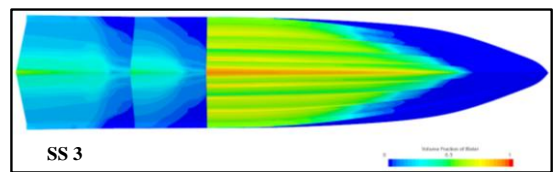
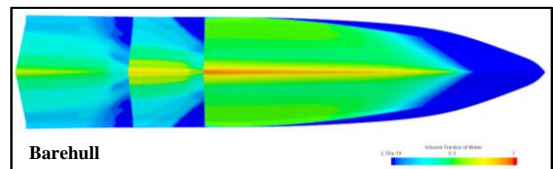


Gambar 21. *Wall shear stress distribution* antara *barehull* dan variasi SS 5 di Fn. 2.29

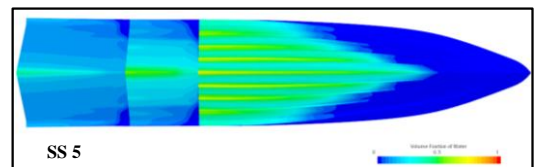
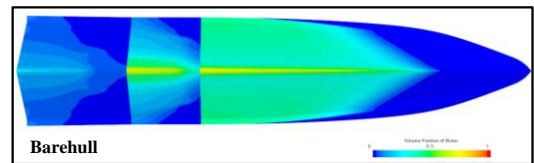
Penambahan *spray strips* juga berpengaruh terhadap area kapal yang terendam air (WSA). Pada Gambar 22 menunjukkan penambahan *spray strips* terhadap kapal *double stepped planing hull* memiliki pengaruh terhadap luasan lambung kapal yang terkena air. Untuk pengurangan terbesar terjadi pada Fn 1.41 variasi SS 3 sebesar 12.83% dan pengurangan terkecil terjadi pada Fn 1.61 variasi SS 5 sebesar 0.12%. Namun juga terjadi penambahan luasan WSA pada variasi *spray strips*, dimana penambahan terbesar terjadi pada Fn 2.07 variasi SS 5 sebesar 6.23%.



Gambar 22. Grafik WSA pada Semua Variasi

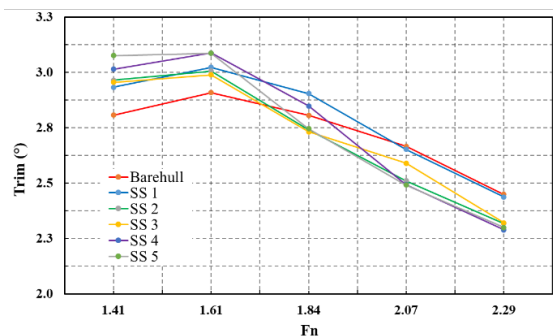


Gambar 23. Visualisasi WSA variasi SS 3 pada Fn 1.41



Gambar 24. Visualisasi WSA variasi variasi SS 5 pada Fn 2.07

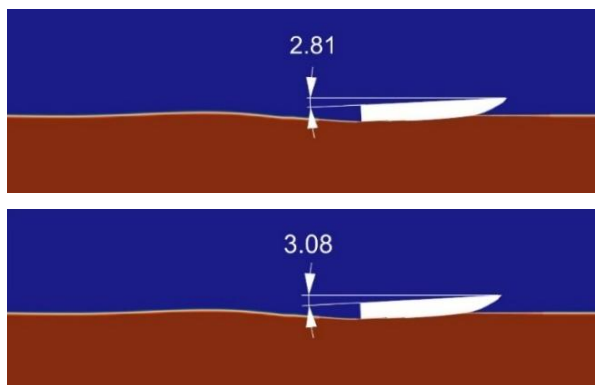
Berdasarkan dari Gambar 25 terdapat kenaikan nilai sudut *trim* untuk Fn 1.41-1.61 disemua variasi, kenaikan paling besar terjadi pada pada Fn 1.41 variasi SS 5 yaitu 9.6%. Kemudian terjadi penurunan nilai *trim* pada Fn 2.07-2.29 disemua variasi, dimana penurunan terbesar pada Fn 2.29 variasi SS 5 sebesar 6.54%.



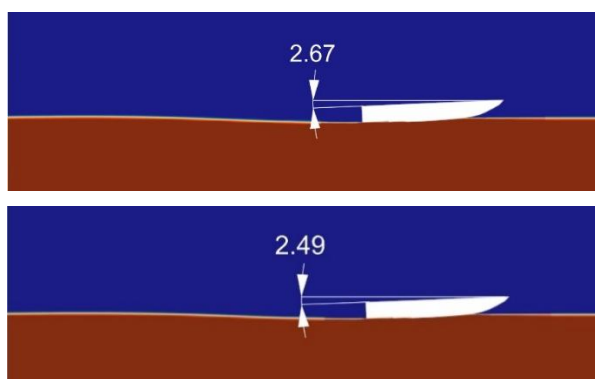
Gambar 25. Grafik Trim pada Semua Variasi



Pada Gambar 26 dan Gambar 27 menunjukkan visualisasi hasil *trim* kapal sebelum dan sesudah penambahan *spray strips*. Untuk variasi SS 5 pada Fn 2.07 menjadi variasi *spray strips* dengan penurunan nilai sudut *trim* terbesar. Untuk variasi SS 5 pada Fn 1.41 menjadi variasi *spray strips* dengan penambahan nilai sudut *trim* terbesar.

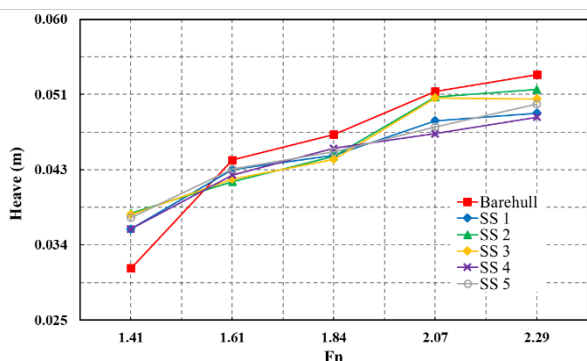


Gambar 26. Perbandingan *Trim* antara *Barehull* dan SS 5 pada Fn 2.07



Gambar 27. Perbandingan *Trim* antara *Barehull* dan SS 5 pada Fn 1.41

Berdasarkan dari Gambar 28 terdapat kenaikan nilai *heave* untuk Fn 1.41 disemua variasi dengan kenaikan terbesar pada variasi SS 2 sebesar 20.57%. Namun terjadi juga penurunan nilai *heave* untuk Fn 1.61- Fn 2.29 disemua variasi. Untuk penurunan terbesar terjadi pada Fn 2.07 variasi SS 4 sebesar 9.54% dan penurunan terkecil nilai *heave* pada Fn 2.07 variasi SS 2 sebesar 1.34%.



Gambar 28. Grafik *Heave* pada Semua Variasi

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa metode numerik CFD mampu memprediksi hambatan total kapal dengan melihat nilai *error* antara nilai simulasi terhadap nilai eksperimen pada penelitian yang sebelumnya dengan angka toleransi yang ditentukan. Nilai terbesar pada terjadi pada Fn 2.07 sebesar 9.39% untuk koreksi hambatan. Kemudian pada nilai *trim* dan *heave* nilai *error* yang terjadi cukup tinggi, akan tetapi memiliki pola grafik yang mirip dengan hasil eksperimen.

Penambahan *spray strips* dapat mengurangi hambatan di semua variasi *spray strips* pada *double stepped planing hull* dimana pengurangan terbesar yaitu 14.96% terjadi pada Fn 1.41 dengan variasi SS 5. Dengan membandingkan hasil dari data simulasi secara keseluruhan variasi dari *spray strips* SS 5 yang memiliki kemampuan terbaik untuk mengurangi hambatan total kapal sebesar 9.28%. Dari hasil simulasi untuk variasi profil *spray strips* pada lambung kapal secara keseluruhan mampu menurunkan nilai hambatan total dibandingkan tanpa *spray strips*. Kemudian besar sudut *spray strips* ( $\delta$ ) juga mempengaruhi penurunan hambatan. Dimana semakin besar sudut ( $\delta$ ) maka semakin kecil hambatan kapal yang dihasilkan.

Instalasi *Spray strips* cukup efektif untuk menurunkan hambatan total kapal pada kecepatan tinggi. *Spray strips* digunakan untuk mengurangi WSA dengan mengatur arah aliran serta memberikan daya angkat ke bagian bawah lambung kapal. Karena ada defleksi air yang lebih besar pada garis stagnasi ketika ada pemasangan *spray strips* pada lambung kapal, sehingga hambatan total keseluruhan dapat dikurangi ketika melaju pada kecepatan tinggi.

Aplikasi dari penambahan *spray strips* pada lambung *double stepped planing hull* dapat mengurangi nilai hambatan total yang dihasilkan. Penurunan nilai hambatan oleh *spray strips* dipengaruhi oleh bentuk dari profil *spray strips*, besar sudut  $\delta$  pada *spray strips* yang dibentuk dan juga kecepatan kapal cukup berpengaruh secara signifikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Hou, B. Johnson, J. Degroff, S. Trenor, and J. Michaeli, "Dynamic response modeling of high-speed planing craft with enforced acceleration," *Ocean Engineering*, vol. 192, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106493.
- [2] Wheeler, K. I. Matveev, and T. Xing, "Numerical study of hydrodynamics of heavily loaded hard-chine hulls in calm

- water,” *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 2, pp. 1–18, doi: 10.3390/jmse9020184.
- [3] D. Savitsky, “On the subject of high-speed monohulls,” *Greek Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)*, pp. 1–44, 2003.
- [4] D. Savitsky and M. Morabito, “Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls,” *Marine Technology and SNAME news*, vol. 47, no. 01, pp. 1–16, 2010.
- [5] R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, and S. Tavakoli, “Hydrodynamic study of heeled double-stepped planing hulls using CFD and 2D+ T method,” *Ocean Engineering*, vol. 196, p. 106813, 2020.
- [6] W. R. Garland, “Stepped planing hull investigation,” *United States Naval Academy*, 2010.
- [7] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*. Cambridge University Press, 2011.
- [8] E. P. Clement, *Effects of longitudinal bottom spray strips on planing boat resistance*. Navy Department, David Taylor Model Basin, 1964.
- [9] Samuel, A. Trimulyono, P. Manik, and D. Chrismianto, “A numerical study of spray strips analysis on fridsma hull form,” *Fluids*, vol. 6, no. 11, p. 420, 2021.
- [10] J. Seo, Choi. H, Jeong. U, Lee. D, Rhee. S, Jung. C, Yoo. J, “Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails,” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 442–455, 2016.
- [11] B. Molchanov, S. Lundmark, M. Fürth, and M. Green, “Experimental validation of spray deflectors for high speed craft,” *Ocean Engineering*, vol. 191, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106482.
- [12] C. Wielgosz, A. Rosén, R. Datla, U. Chung, and J. Danielsson, “Experimental modelling of spray deflection influence on planing craft performance in calm water and waves,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 234, no. 2, pp. 399–408, doi: 10.1177/1475090219887326.
- [13] A. H. Muhammad, “Kajian Hidrodinamika Pengaruh Peletakan Spray-Strake Pada Kapal Patroli Cepat Tipe Planning Hull.” *Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Makassar*, 2009.
- [14] L. Castaldi, F. Osmak, M. Green, M. Fürth, and J. Bonoli, “The effect of spray deflection on the performance of high speed craft in calm water,” *Ocean Engineering*, vol. 229, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108892.
- [15] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Sheno, “Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water,” *International Journal of Small Craft Technology*, vol. 152, pp. 55–75, 2010.
- [16] D. Savitsky, M. F. DeLorme, and R. Datla, “Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls,” *Marine Technology and SNAME News*, vol. 44, no. 01, pp. 35–56, 2007.
- [17] Muller-Graf, “The effect of an advanced spray rail system on resistance and development of spray of semi-displacement round bilge hulls,” 1991.
- [18] S. Mancini, “The problem of verification and validation processes of CFD simulations of planing hulls,” *Department of Industrial Engineering. Università Degli Studi Di Napoli*, 2015.
- [19] ITTC, “Practical guide;ines for ship CFD applications,” *ITTC – Recomm. Proced. Guidel. ITTC*. pp. 1-8, 2011.
- [20] M. Bakhtiari, S. Veysi, and H. Ghassemi, “Numerical modeling of the stepped planing hull in calm water,” *International Journal of Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 236–245, 2016.