

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang mempunyai banyak pulau yang menjadi penyebab sangat dibutuhkannya sebuah kapal, kapal dibuat berbagai jenis dan tipe yang sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya masing-masing, salah satunya adalah kapal patroli.

Kapal patroli umumnya berupa kapal cepat bertipe *planing hull* (Prakoso dan Samuel, 2022). Kapal tipe ini biasanya digunakan sebagai kapal patroli perairan dan penjagaan pantai, selain itu kapal tipe *planing hull* memiliki kecepatan yang tinggi (Muhammad, 2009). Kapal tipe *planing hull* akan menghasilkan tekanan hidrodinamis yang tinggi dalam kecepatan tinggi untuk mengurangi tahanan pada kapal (Hou et al., 2019).

Saat kapal beroperasi di daerah perairan yang berbeda, tentunya perairan tersebut mempunyai perbedaan kedalaman karena terdapat perbedaan bentuk geografi pada setiap wilayah yang ada di Indonesia. Pada penelitian yang dilakukan oleh Elaghbash (2021) model kapal berupa *planing hull* berupa plat datar pada bagian *bottom*, tahanan total yang terjadi pada kapal *planing hull* di perairan dangkal lebih besar dibandingkan tahanan total yang terjadi di perairan dalam dengan selisih terbesar mencapai 43% pada *critical speed* kapal 0,9 m/s, dikarenakan perairan dangkal, berdasarkan pembatas aliran antara dasar laut dan lambung bagian dasar kapal, aliran fluida di bawah kapal akan meningkatkan kecepatan dan menurunkan tekanan yang mendukung lambung kapal, hal ini disebut efek aliran balik (*backflow effect*), kecepatan fluida meningkat menyebabkan peningkatan tahanan, sedangkan penurunan tekanan air di bawah lambung kapal akan mengubah posisi lambung kapal. Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Utomo et al. (2023) model kapal *planing hull* sepanjang lambung kapal memiliki *hard chine* atau bentuk lambung jenis *V-shape*, hasil penelitian diperoleh bahwa tahanan rata-rata pada perairan dalam dapat mengurangi tahanan total sekitar 22,34% dibandingkan dengan tahanan total yang terjadi perairan dangkal hal ini terjadi karena fenomena *squat (squat phenomenon)* yang terjadi pada lambung kapal.

Patel dan Premchand (2015) efek hidrodinamika bervariasi tergantung pada kedalaman air, gaya-gaya pada kapal terus meningkat seiring dengan berkurangnya kedalaman air. Perhitungan gaya hidrodinamika merupakan komponen terpenting dalam analisis kapal berkecepatan tinggi khususnya kapal cepat bertipe *planing hull* (Yousefi et al., 2013). Gaya yang bekerja pada kapal tipe *planing hull* sangat dipengaruhi oleh permukaan basah lambung, yang pada dasarnya juga dipengaruhi oleh posisi lambung di dalam air, maka dari itu penting untuk memprediksi tahanan yang terjadi pada kapal (Frisk dan Tegehall, 2015).

Berdasarkan hasil uji eksperimental, sejumlah percobaan telah dilakukan dan serangkaian pendekatan telah dikembangkan untuk perhitungan gaya hidrodinamika

yang bekerja pada lambung kapal, dibuat sebuah metode yang bersifat semi-empiris dan secara umum digunakan untuk estimasi kinerja kapal *planing hull*. Pada saat ini, dengan perkembangan komputer dan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, simulasi numerik menjadi cara yang umum digunakan, telah banyak peneliti yang membuat perbandingan antara metode *CFD* dan uji eksperimental untuk membuktikan keakuratan metode numerik (Zhang dan KIM, 2015).

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh (Wang et al., 2020) analisis hidrodinamika kapal *planing hull* dilakukan diperairan air tenang, hasil dari simulasi *CFD* menggunakan *software STAR CCM+* dikonfirmasi dengan data eksperimental (metode Savitsky) menunjukkan akurasi cukup baik. Pada penelitian yang lain dilakukan oleh (Utama et al., 2021) perhitungan tahanan kapal *planing hull* dilakukan diperairan tenang dengan 3 metode yang berbeda yaitu menggunakan *Maxsurf Resistance* (metode Savitsky untuk perhitungan), metode *CFD* menggunakan *software ANSYS CFX*, dan metode eksperimen, dimana pada ketiga metode yang digunakan memiliki tren tahanan yang sama. Pada penelitian yang dilakukan oleh Furukawa et al. (2016) terdapat rumus atau persamaan empiris untuk mengestimasi tahanan total yang terjadi pada kedalaman perairan dalam maupun dangkal dengan mengubah nilai tahanan total menjadi koefisien tahanan total. *CFD* dapat digunakan secara efektif untuk prediksi tahanan kapal pada kecepatan yang berbeda dengan waktu dan biaya pengujian model dapat dikurangi secara signifikan dengan penerapan *CFD* (Senthil Prakash dan Chandra, 2013).

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa kedalaman suatu perairan sangat mempengaruhi gaya-gaya yang bekerja pada kapal khususnya mengenai tentang tahanan yang terjadi pada kapal, penggunaan *CFD* sangatlah umum digunakan untuk mendapatkan hasil analisis perhitungan tahanan kapal tipe *planing hull*, sehingga peneliti terdorong untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kedalaman perairan terhadap tahanan kapal patroli tipe *planing hull* menggunakan metode *CFD*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat diidentifikasi beberapa rumusan masalah dalam Penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kedalaman perairan terhadap tahanan total pada kapal patroli tipe *planing hull*?
2. Bagaimana pengaruh kedalaman perairan terhadap komponen tahanan (*pressure drag* dan *friction drag*) dan *lift* pada kapal patroli tipe *planing hull*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik tahanan kapal pada berbagai level kedalaman perairan
2. Untuk mengetahui komponen tahanan yang paling terdampak terhadap perubahan kedalaman perairan

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjadi rujukan bagi operator kapal untuk mengendalikan kecepatan kapal berdasarkan kedalaman perairan
2. Memperkaya referensi di kajian hidrodinamika kapal bagi pengkaji hidrodinamika kapal

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka permasalahan yang akan dibahas dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Kapal yang digunakan adalah kapal patroli tipe *planing hull*
2. Penelitian menggunakan *software ANSYS CFX 2021 R2*
3. Simulasi tahanan kapal patrol tipe *planing hull* dilakukan pada variasi rasio kedalaman h/T :
 - a. 4 (*Deep Water*)
 - b. 2 (*Medium Water*)
 - c. 1,4 (*Shallow Water*)
4. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 25 dan 30 knot
5. Simulasi dilakukan di perairan air tenang
6. Perbandingan hasil simulasi tahanan total *CFD* dengan eksperimen pada kedalaman perairan h/T 4 (*Deep Water*) sedangkan untuk kedalaman perairan h/T 2 (*Medium Water*) dan h/T ,4 (*Shallow Water*) antara *CFD* dengan *empirical*

1.6 Teori dasar

Dalam mengerjakan penelitian ini digunakan teori dasar yang mendukung penelitian agar sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Adapun teori yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1.6.1 Karakteristik Kapal Tipe *Planing Hull*

Rosmani et al. (2024) sebagai salah satu tipe kapal cepat, kapal *planing hull* mempunyai tingkat efisiensi yang baik. Yousefi et al. (2013) saat kapal *planing hull* bergerak, distribusi tekanan hidrodinamik yang terjadi pada kapal menciptakan gaya angkat dan seiring meningkatnya kecepatan kapal, gaya angkat pada kapal meningkat disertai dengan lambung kapal keluar dari air, menjadi penyebab berkurangnya luas permukaan basah kapal. Kapal *planing hull* memiliki 3 mode gerak yaitu displacement, semi-*planing* (transition), dan *planing*. Dalam mode displacement, untuk mencapai kecepatan lebih tinggi, diperlukan daya mesin yang lebih besar, jika kapal beralih ke mode gerak *planing*, gaya hidrodinamik yang dihasilkan oleh bagian kapal yang terendam mengangkat lambung kapal ke

permukaan air dan menyebabkan gerakan yang lebih cepat dapat dilihat pada Gambar 1.

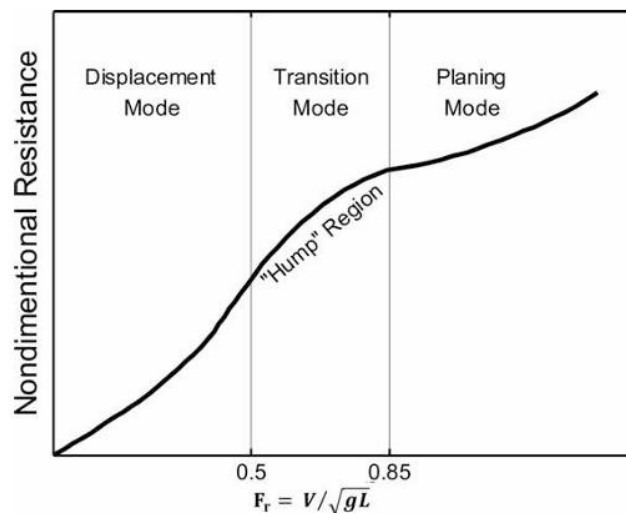


Gambar 1 Kapal tipe *planing hull* dalam mode gerakan *planing*
Sumber: Yousef et al., 2013.

Kapal dalam mode *planing* dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan memerlukan daya yang lebih kecil untuk kecepatan kapal yang sama akibat dari luas permukaan basah kapal yang terendam berkurang. Perilaku tahanan pada tiga mode gerak kapal yaitu *displacement*, *semi-planing* (transisi), dan *planing* dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai fungsi dari bilangan *Froude* yang dapat didefinisikan sebagai:

$$F_r = V/\sqrt{gL} \quad (1.1)$$

Dimana V adalah kecepatan maju (m/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s²), dan L adalah panjang lambung di garis air (m).



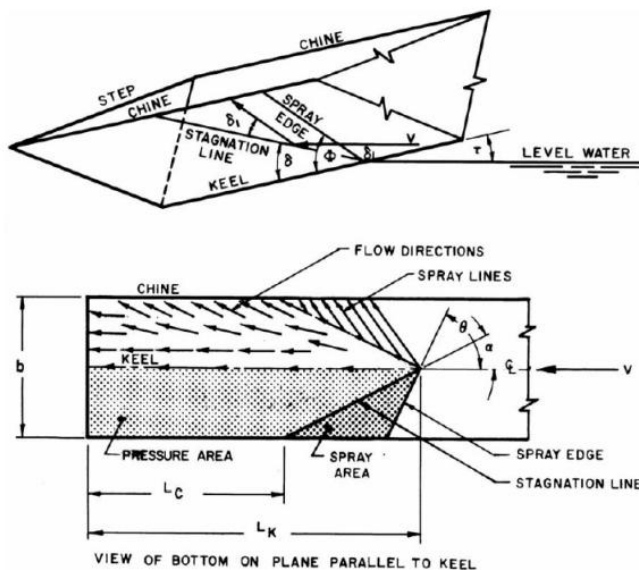
Gambar 2 Tahanan kapal sebagai fungsi kecepatan dalam tiga mode gerakan
 Sumber: Yousef et al., 2013.

Nilai F_r lambung pada mode *displacement* kurang dari $\sim 0,5$. Kecepatan kapal di atas nilai ini masuk ke dalam wilayah "*hump region*" yang merupakan transisi antara mode *displacement* dan *planing*. Ketika F_r melebihi 0,85, lambung beralih ke mode *planing*. Kapal akan mengalami kondisi yang berbeda dalam masing-masing mode gerakan. Misalnya, Gerakan kapal *planing hull* dalam mode gerak *displacement* sangat mirip dengan gerakan kapal tipe *displacement*. Sebagai salah satu tipe kapal cepat, tentunya karakteristik kapal *planing hull* dipengaruhi oleh *Froude Number* yang besar untuk dapat mencapai kecepatan tinggi (Rosmani et al., 2023).

1.6.2 Hidrodinamika Kapal Tipe *Planing Hull*

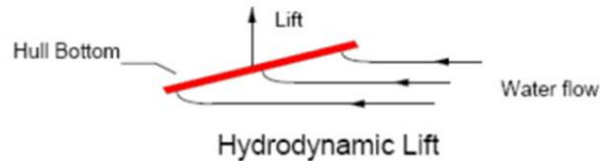
Muhammad (2009) penelitian awal hidrodinamika kapal tipe *planing hull* telah dimulai di Amerika Serikat (AS) sejak 40 tahun yang lalu. Penelitian ini awalnya bertujuan untuk merencanakan sebuah *aircraft (flying boat)* dimana air adalah sebagai media pendaratan kapal. Seiring dengan kemajuan teknologi, konsep ini dikembangkan untuk desain lambung sebuah kapal berkecepatan tinggi atau dikenal dengan *planing hull*.

Savitsky menuliskan secara sederhana prosedur perhitungan dalam memprediksi perilaku hidrodinamika kapal tipe *planing hull*, khususnya dalam menentukan luas bidang basah, besarnya gaya angkat dan gaya dorong yang dialami kapal, pusat tekanan yang dialami kapal semasa dioperasikan serta batasan stabilitas kapal hubungannya dengan *deadrise* dan *trim* kapal pada sejumlah kecepatan. Gambar 3 menampilkan sebuah sketsa luas permukaan basah kapal tipe *planing hull*, parameter *trim*, *deadrise* dan arah aliran hidrodinamika kapal.



Gambar 3 Luasan permukaan basah kapal lambung permukaan rata
Sumber: Muhammad, 2009.

Secara umum, lambung kapal tipe *planing hull* berlayar dengan *trim* pada buritan berarti menaikkan haluan dan membenamkan buritan sebagai hasil dari permukaan yang rata, Gambar 4 menunjukkan gaya hidrodinamika yang mendorong lambung kapal ke luar dari permukaan air (Elaghbash, 2021).



Gambar 4 Daya angkat hidrodinamis lambung kapal tipe *planing hull*
Sumber: Elaghbash, 2021.

Ada banyak penelitian mengenai tentang kapal tipe *planing hull*, pada penelitian yang dilakukan oleh (Nourghassemia et al., 2019) memperlihatkan beberapa penelitian tentang kapal tipe *planing hull* yang sudah dilakukan, dapat dilihat pada Tabel 1:

Tabel 1 Penelitian numerik dan eksperimental kapal *planing hull*

Peneliti	Topik	Tahun
Savitsky	Pemodelan kapal <i>planing</i> pada lambung prisma dengan sudut <i>Deadrise</i> dan memperoleh hubungan regresi berdasarkan uji model untuk perhitungan gaya hidrodinamik.	1964
Savitsky et al.	Investigasi pengaruh <i>water spray</i> pada buritan dan pengaruhnya terhadap hambatan kapal <i>planing</i> .	2007
Brizzolara dan Serra	Studi permukaan <i>planing</i> pada mode konstan dengan CFD dan membandingkan hasilnya dengan data eksperimental.	2007
Ghassemi et al.	Pengembangan kode programan berbasis komputer berdasarkan <i>boundary element method (BEM)</i> untuk analisis kapal <i>planing</i> dan nonplaning serta penerapannya dalam analisis hidrodinamika kapal.	2007, 2008, 2010
Yu-Min et al.	Investigasi kinerja hidrodinamika kapal <i>planing</i> dengan CFD berdasarkan metode <i>Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)</i> dalam dua derajat kebebasan.	2012

1.6.3 Tahanan Kapal

Rosmani et al. (2024) tahanan kapal adalah besar gaya fluida yang melawan laju kapal pada kecepatan tertentu, gaya ini sejajar dengan arah sumbu kapal saat bergerak tetapi arahnya berlawanan dengan arah pergerakan kapal. Tahanan kapal pada kapal planing hull menggunakan savitsky's formula terdiri dari 2 komponen yaitu komponen tekanan (*pressure force* atau *pressure drag*) dan komponen gesek (*friction force* atau *friction drag*) (Febrian et al., 2018). Untuk komponen tekanan D_p dapat menggunakan persamaan (1.2) (Savitsky, 1964):

$$D_p = \Delta \tan \tau \quad (1.2)$$

Dimana D_p adalah komponen tekanan, Δ adalah displasmen, τ adalah sudut *trim*. Untuk mendapatkan komponen gesek dapat menggunakan persamaan (1.3) (Savitsky, 1964) berikut:

$$D_f = \frac{C_f \rho V^2 (\lambda b^2)}{2 \cos \beta} \quad (1.3)$$

Dimana D_f adalah komponen gesek, C_f adalah koefisien gesek *Schoenher* atau koefisien gesek, ρ adalah massa jenis air, V adalah kecepatan, λ adalah L/B area basah, b adalah *beam of planing surface*, β adalah sudut *deadrise*. Untuk koefisien gesek bisa menggunakan persamaan (ITTC, 2011):

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (1.4)$$

Dimana Re adalah bilangan *Reynolds*. Selanjutnya untuk menemukan *trim* pada kapal adalah pertama dengan mencari *lift coefficient* yang dapat menggunakan persamaan (1.5) (Faltinsen, 2005) berikut:

$$C_{L\beta} = \frac{F_{L\beta}}{0,5 \rho U^2 B^2} \quad (1.5)$$

Dimana $C_{L\beta}$ adalah *lift coefficient*, $F_{L\beta}$ adalah *lift*, U adalah kecepatan kapal, B adalah *beam of planing surface*. Setelah *lift coefficient* didapatkan kemudian memasukan nilai *lift coefficient* untuk mendapatkan nilai C_{L0} dengan menggunakan persamaan (1.6) (Faltinsen, 2005) berikut:

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0,0065 \beta C_{L0}^{0,60} \quad (1.6)$$

Dimana C_{L0} adalah *lift coefficients for zero deadrise angle*. Setelah mendapatkan nilai tersebut kemudian mendapatkan *trim* menggunakan persamaan (1.7) (Faltinsen, 2005) berikut:

$$C_{L0} = \tau_{deg}^{1,1} (0,012\lambda_W^{0,5} + 0,0055\lambda_W^{2,5}/Fn_B^2) \quad (1.7)$$

Dimana τ_{deg} adalah sudut trim pada kapal planing, λ_W adalah *mean wetted length-to-beam ratio*, $Fn_B = U/(gB)^{0,5}$. Dari komponen tahanan di atas yaitu (*pressure drag* dan *friction drag*), tahanan total pada kapal planing hull dapat dituliskan sebagaimana persamaan (1.8) (Savitsky dan Brown, 1976) berikut:

$$RT = \Delta \tan \tau + \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 \lambda b^2 C_f}{\cos \tau \cos \beta} \quad (1.8)$$

Dimana RT adalah tahanan kapal. Dari persamaan (1.8) tersebut bisa disederhanakan menjadi persamaan (1.9) berikut:

$$RT = D_p + \frac{D_f}{\cos \tau} \quad (1.9)$$

Adapun validasi tahanan total kapal pada kedalaman perairan *Deep* (h/T 4) dilakukan dengan membandingkan nilai tahanan total dengan hasil eksperimen sedangkan untuk kedalaman perairan *Medium* (h/T 2) dan *Shallow* (h/T 1,4) dilakukan dengan mengubah nilai tahanan total menjadi koefisien tahanan total menggunakan pendekatan *empirical* oleh Furukawa et al. (2016) yang dapat dilihat pada persamaan (1.10) dan (1.11) berikut:

$$R'_0 = \frac{R_0}{(1/2) \rho L T U^2} \quad (1.10)$$

$$\frac{[R'_0]_{shallow}}{[R'_0]_{deep}} = 0,338(T/H)^2 + 1 \quad (1.11)$$

Dimana R'_0 adalah koefisien tahanan total, R_0 adalah tahanan total, ρ adalah massa jenis air, L adalah panjang kapal, T adalah sarat kapal, U adalah kecepatan kapal dan H adalah kedalaman air.

1.6.4 Klasifikasi Kedalaman Perairan

Patel dan Premchand (2015) efek hidrodinamika bervariasi tergantung pada kedalaman air, gaya-gaya pada kapal terus meningkat seiring dengan berkurangnya kedalaman air, klasifikasi perairan dangkal tergantung pada rancangan kapal, hal ini disebutkan sebagai rasio *draft* terhadap kedalaman air (Pianc, 1992), dengan h adalah tinggi air permukaan ke dasar perairan, dan T adalah sarat kapal, yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2 Klasifikasi kedalaman perairan

Type Perairan	Rasio h/T
<i>Deep Water</i>	>3,0
<i>Medium Water</i>	1,5 – 3,0
<i>Shallow Water</i>	1,2 – 1,5
<i>Very Shallow Water</i>	<1,2

Sumber: Patel dan Premchand, 2015.

Elaghabash (2021) aliran air yang dibatasi seperti terusan, danau, pelabuhan, dan sebagainya, mempunyai efek pada tahanan total karena terdapat pembatasan pada kedalaman air. Di perairan dangkal, berdasarkan pembatas aliran antara dasar laut dan lambung bagian dasar kapal, aliran fluida di bawah kapal akan meningkatkan kecepatan dan menurunkan tekanan yang mendukung lambung kapal, hal ini disebut efek aliran balik (*backflow effect*), kecepatan fluida meningkat menyebabkan peningkatan tahanan, sedangkan penurunan tekanan air di bawah lambung kapal akan mengubah posisi lambung kapal.

1.6.5 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Versteeg (2007) *Computational Fluid Dynamic (CFD)* merupakan proses menganalisis sistem yang terkait dengan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena reaksi kimia melalui simulasi berbasis komputer, penggunaan *CFD* dapat mengurangi waktu dan biaya dibandingkan dengan menggunakan pendekatan eksperimen. Dalam Simulasi menggunakan *CFD* terdapat 3 proses yaitu:

1. *Pre-processor* merupakan tahapan awal dalam melakukan simulasi *CFD* yang terdiri dari pembuatan dan definisi geometri, pembuatan grid atau pembagian domain, pemilihan fenomena fisika dan kimia yang dimodelkan dalam simulasi, penentuan properti fluida dan penentuan kondisi batas pada simulasi.
2. *Solver* merupakan tahapan kedua dalam melakukan simulasi yang terdiri dari pemilihan metode numerik dan proses perhitungan atau *running*, secara umum terdapat 3 metode solusi numerik yaitu: beda hingga (*finite difference*), elemen hingga (*finite element*), dan metode *spectral*. Pada dasarnya algoritma numerik pada simulasi *CFD* terdiri dari integrasi persamaan yang mengatur aliran fluida pada semua volume kontrol dari domain, pemilihan diskritisasi, konvergensi persamaan dan solusi persamaan aljabar dengan metode iteratif.
3. *Post-processor* merupakan tahapan terakhir dari simulasi yaitu berupa hasil perhitungan dari proses simulasi dan hasil perhitungan juga ditampilkan dalam bentuk gambar bahkan berupa animasi dengan pola warna tertentu.

CFD pada dasarnya menggantikan persamaan *diferensial parsial* kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan aljabar. Persamaan dasar yang

digunakan adalah persamaan *Navier-Stokes*, dalam perhitungan aliran fluida yang terjadi diatur oleh hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Persamaan *Navier-Stokes* ini ditemukan oleh G.G. Stokes di Inggris dan M. Navier di Perancis sekitar tahun awal tahun 1800. Adapun untuk persamaan *Navier-Stokes* seperti persamaan kontinuitas (1.12), persamaan momentum (1.13), (1.14), (1.15), dan persamaan energi (1.16) yaitu sebagai berikut (Versteeg, 2007):

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.12)$$

2. Persamaan Momentum

- Momentum ke arah sumbu x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \quad (1.13)$$

- Momentum ke arah sumbu y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My} \quad (1.14)$$

- Momentum ke arah sumbu z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz} \quad (1.15)$$

3. Persamaan Energi

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{ div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (1.16)$$

Dimana, x adalah koordinat sumbu X, y adalah koordinat sumbu Y, z adalah koordinat sumbu Z, u adalah komponen kecepatan U (m/s), v adalah komponen kecepatan V, w adalah komponen kecepatan W, t adalah waktu, ρ adalah densitas, p adalah tekanan, S_M adalah *momentum source*, i adalah internal energi, k adalah konduktivitas termal, T adalah temperatur, Φ adalah laju disipasi energi (*dissipation function*) dan S_i adalah *energy source*.

Pada persamaan kontinuitas menyatakan bahwa laju perubahan massa dalam volume kontrol yang sangat kecil sama dengan laju fluks massa yang melewati permukaan pembatasnya. Persamaan momentum menyatakan bahwa laju perubahan momentum untuk volume kontrol yang sangat kecil sama dengan laju di mana momentum masuk atau keluar melalui permukaan volume kontrol, ditambah jumlah gaya yang bekerja pada volume itu sendiri. Persamaan energi menyatakan bahwa laju perubahan energi internal pada volume kontrol sama dengan laju masuknya entalpi, ditambah kerja yang dilakukan pada volume kontrol oleh tekanan viskos (τ) (Molland et al., 2017).

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Dan Waktu Penelitian

Adapun lokasi dan waktu penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Lokasi Penelitian
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Propulsi Kapal Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Waktu Penelitian
Penelitian dilakukan sejak bulan Oktober 2024.

2.2 Studi Literatur

Pada tahap ini peneliti mengumpulkan teori-teori dasar, rujukan yang bersifat umum dan khusus, serta berbagai informasi pendukung lainnya yang berhubungan dengan penelitian. Dalam hal ini, teori karakteristik kapal tipe planing hull, teori hidrodinamika kapal tipe *planing hull*, teori tahanan kapal, teori klasifikasi kedalaman perairan dan teori simulasi *CFD*. Studi literatur ini dapat diperoleh dari buku, jurnal, paper maupun dari internet.

2.3 Pengumpulan Data

Pada tahapan ini data-data yang dibutuhkan untuk mengerjakan tugas akhir ini dikumpulkan dari berbagai sumber seperti ukuran utama kapal yang diperoleh dari penelitian sebelumnya dan data-data yang terkait dari internet, jurnal, dan buku yang terkait dengan penelitian ini. Adapun data ukuran utama kapal yang digunakan sebagaimana Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3 Data kapal patroli rajawali

Parameter	Dimensi
Panjang keseluruhan (LOA)	22 (m)
Displasmen (Δ)	55,16 (ton)
Lebar <i>chine</i> (Bx)	4,906 (m)
Panjang <i>chine</i> (Lp)	21,13 (m)
<i>Bottom deadrise</i> tengah kapal (β)	22,95 (deg)
Sarat (T)	1,243 (m)
Koefisien Blok (CB)	0,435

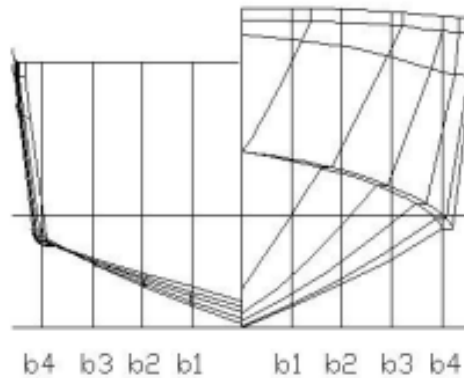
Sumber: Muhammad, 2009.

Untuk melakukan simulasi *CFD* perlu menentukan protokol pengujian untuk mendapatkan nilai tahanan total kapal. Adapun data protokol pengujian berupa rasio kedalaman perairan dan kecepatan kapal sebagaimana Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4 Protokol pengujian

Parameter	Dimensi
Rasio kedalaman perairan	h/T 4; h/T 2; h/T 1,4
Kecepatan kapal	10; 12,5; 15; 17,5; 20; 25; 30 (knot)

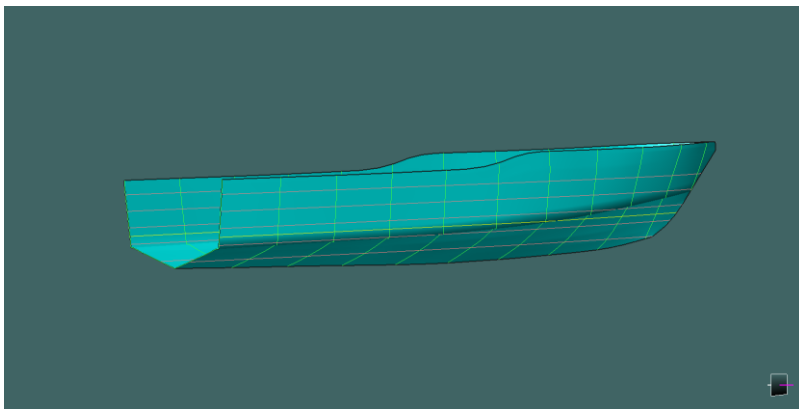
Selain data ukuran utama kapal dan protokol pengujian, diperlukan juga gambar *body plan* untuk melakukan *re-modelling* lambung kapal sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 *Body plan* model *bare hull*
Sumber: Muhammad, 2009.

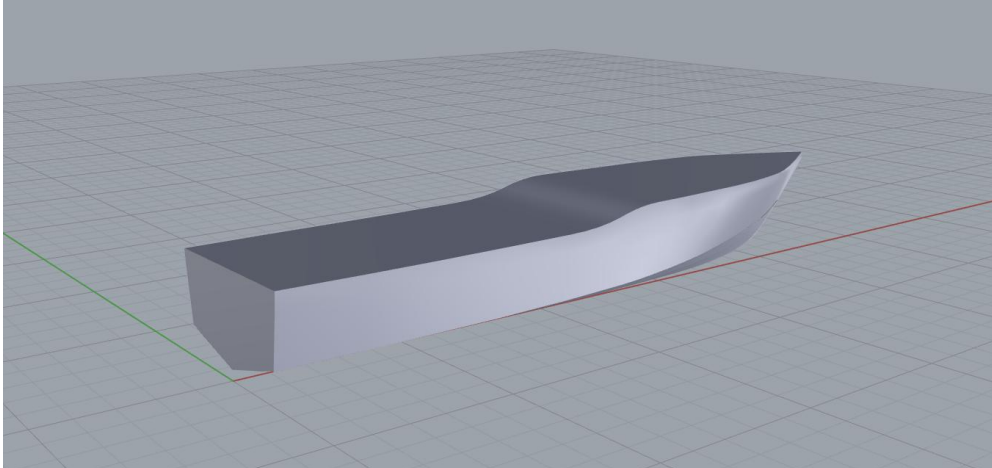
2.4 Pembuatan Model

Dalam proses pemodelan, data kapal yang telah didapatkan melalui studi literatur akan digunakan untuk membuat model. Model ini terdiri dari lambung Kapal. Kapal yang digunakan adalah kapal patroli tipe *planing hull*, dalam pemodelan lambung kapal, parameter yang digunakan adalah *Overall length* (LOA), *Draft* (T), lebar *chine*, panjang *chine*, *bottom deadrise* tengah kapal, C_b (Koefisien blok), dan Displasmen (Δ). Pemodelan dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Maxsurf Modeller* yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Bentuk 3D lambung kapal model *bare hull*

Selanjutnya penyempurnaan model lambung akan menggunakan aplikasi *Rhinoceros* 8.0 untuk menjadikan model lambung kapal berbentuk solid yang akan disimpan dalam bentuk file stp (.stp) untuk memudahkan pembacaan geometri di aplikasi ANSYS.



Gambar 7 Model lambung kapal pada aplikasi *rhinoceros* 8.0

Hasil model yang telah dimodelkan telah berbentuk solid pada aplikasi *Rhinoceros* 8.0 yang ditunjukkan pada Gambar 7, selanjutnya model akan disimulasikan di aplikasi *ANSYS Workbench* 2021 R2 menggunakan *toolbox Fluid Flow (CFX)*.

2.5 Simulasi CFD

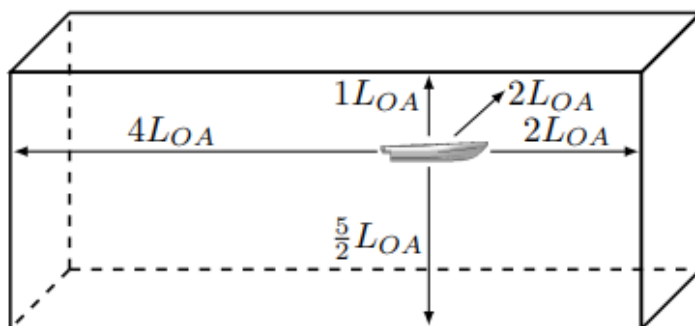
Pada penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik *solver fluid flow analys (CFX)* berbasis *Computational Fluid Dynamic (CFD)* melalui aplikasi *ANSYS Workbench* 2021 R2. Langkah-langkah simulasi dibagi dalam 3 tahapan yaitu:

1. *Pre-processor*, tahap ini merupakan tahapan awal dari menggunakan *ANSYS CFX* yang terdiri dari 2 tahap yaitu: tahap geometri dan tahap *mesh*.
2. *Solver*, tahap ini merupakan tahapan setelah *geometry* dan *mesh* dilakukan, tahapan ini terdiri tahap setup dan *solution*.
3. *Post-processor*, setelah data di proses hasil perhitungan ditampilkan, dalam bentuk gambar bahkan berupa animasi dengan pola warna tertentu, dalam *ANSYS CFX* terdapat pada menu *result*.

Pada simulasi *ANSYS CFX*, proses dan penjelasan yang dikerjakan dari beberapa tahapan seperti, *geometry*, *mesh*, *setup*, *solution* dan *result*, akan dijelaskan di bawah ini:

- Tahap *geometry*

Tahap ini merupakan tahapan awal yang dilakukan pada proses simulasi di ANSYS CFX, dengan memasukkan model yang telah dibuat dalam bentuk file stp (.stp) dan membuat domain untuk fluida serta memberikan nama identitas domain. Berdasarkan ITTC (2011) dimensi domain pada simulasi harus memiliki ukuran 1-2 L_{pp} dari depan atau haluan kapal untuk *inlet* dan untuk dimensi *outlet* harus memiliki ukuran 3-5 L_{pp} dari belakang kapal. Frisk dan Tegehall (2015) pada Gambar 8 merupakan dimensi domain yang minimum yang di rekomendasikan dan mengacu pada (ITTC, 2011).



Gambar 8 Dimensi domain fluida
Sumber: Frisk dan Tegehall, 2015.

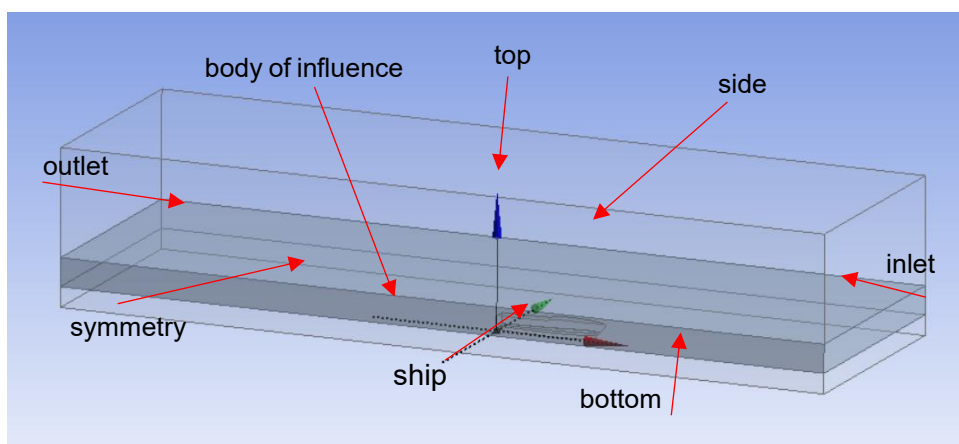
Proses pembuatan *geometry* dan domain fluida menggunakan design modeler di ANSYS. Langkah pertama *import* file model dengan klik kanan pada menu *file* > *import external geometry file* > pilih file model dengan format stp yang telah dibuat sebelumnya > pilih *generate* untuk memunculkan model kapal.

Membuat domain fluida dengan memilih *enclosure* pada *menu tools* > klik *enclosure* > sesuaikan dimensi domain fluida yang digunakan. Berdasarkan ITTC (2011) dimensi domain pada simulasi harus memiliki harus memiliki ukuran 1-2 L_{pp} dari depan atau haluan kapal untuk inlet dan untuk dimensi outlet harus memiliki ukuran 3-5 L_{pp} dari belakang kapal. Frisk dan Tegehall (2015) memiliki dimensi domain yang di rekomendasikan dan memenuhi ukuran domain minimum ITTC (2011) dengan jarak dinding depan dengan haluan kapal 2 LOA, jarak dinding samping terhadap samping kapal 2 LOA, jarak dinding atas dengan bagian atas kapal 1 LOA, jarak dinding belakang dengan bagian buritan kapal 4 LOA, dan untuk jarak dinding yang berada di bawah kapal akan disesuaikan berdasarkan variasi h/T dan pilih *generate* untuk memunculkan *enclosure*. Menghilangkan volume model kapal yang ada dalam domain fluida dengan pilih menu *create* > pilih *boolean* > *details target bodies* pilih domain fluida > *details tool bodies* pilih model kapal > *generate*.

Membuat *body of influence*, dengan cara pertama pilih sumbu ZX plane > pilih *new sketch* > pilih *sketching* > pilih *draw rectangle* untuk membuat kotak pada sekitar kapal sebagai *body of influence* > pilih *dimension length/distance* untuk mengatur ukuran *body of influence* > *generate*. Selanjutnya untuk menjadikanya sebagai

fluida/solid pilih menu *create* > *extrude* > pilih *sketch* yang dibuat sebelumnya untuk *details geometry* > pilih *add frozen* untuk *details operation* > pilih *both-symmetric* untuk *details direction* > dan ukuran *details depth* disesuaikan dengan ukuran jarak dinding samping terhadap samping kapal > *generate*.

Pada *geometry* untuk model dan *boundary condition* akan menggunakan metode *symmetry* (separuh bentuk) agar simulasi yang dilakukan cepat dan agar dalam proses *meshing* yang akan dilakukan dapat dioptimalkan. Cara membuat separuh bentuk dengan pilih menu *tools* > pilih *symmetry* > pilih sumbu *ZX plane* untuk detail *symmetry plane 1* > *generate*.



Gambar 9 Domain fluida simulasi *CFD*

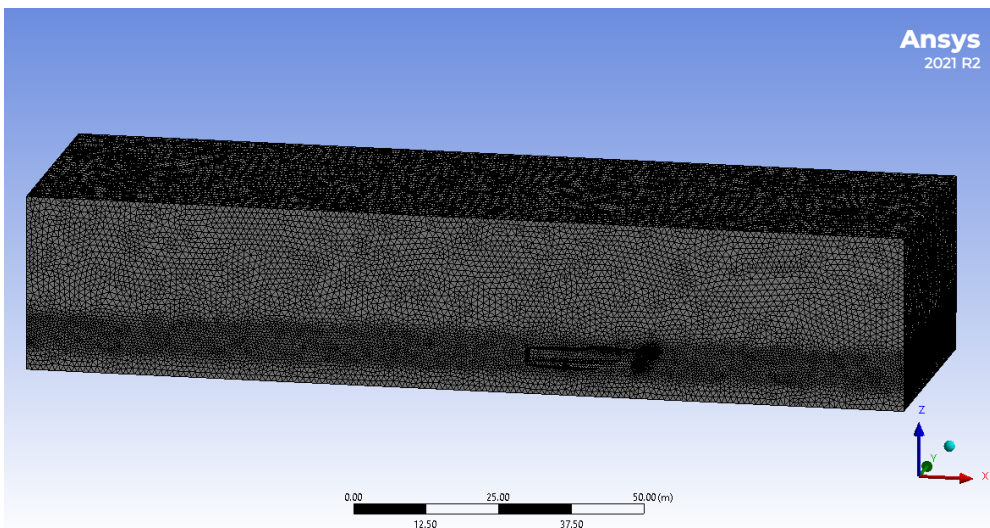
Pada pembuatan domain fluida pada simulasi tahanan terdiri dari nama *inlet*, *outlet*, *side*, *top*, *bottom*, *symmetry* dan *ship* pada domain fluida. Caranya dengan pilih menu *tools* > pilih *name selection* > berikan nama pada *named selection* > pilih bagian domain yang ingin diberikan nama, pastikan menggunakan *selection filter: faces* untuk *details geometry*. Pemberian nama ini akan terlihat di *menu tree outline*, pemberian nama ini akan digunakan untuk memberikan identitas boundary fluida pada tahapan *setup*. Pemberian nama untuk domain, ukuran domain dan kondisi batas simulasi dapat dilihat pada Gambar 9.

- Tahap *mesh*

Tahap *mesh* merupakan tahap yang dilakukan setelah tahapan *geometry*, dimana tahap ini akan membagi model *geometry* kedalam beberapa elemen sederhana untuk proses perhitungan atau running pada tahap *solution*. Tahapan ini akan mempengaruhi akurasi dari perhitungan, kecepatan simulasi, dan konvergensi. Langkah-langkah pada tahapan *mesh*, caranya dengan pilih menu *mesh* > *elemen size* untuk ukuran mesh 1 m. Memperkecil ukuran *mesh* yang ada disekitar kapal dengan menggunakan *body of influence*, cara dengan pilih menu *mesh* > klik kanan pilih *insert* > pilih *sizing* > *scope geometry* klik domain fluida > *definition type* pilih

body of influence > *definition body of influence* klik *body of influence* yang sudah dibuat > *elemen size* untuk ukuran mesh 0,5 m.

Pada penelitian ini mesh dilakukan dengan menggunakan *inflation* pada kapal, caranya dengan pilih *menu mesh* > klik kanan pilih *insert* > pilih *inflation* > klik domain fluida untuk *scope geometry* > pilih *named selections* untuk *definition boundary scoping method* > pilih *first layer thickness* untuk *definition inflation option* > masukan ukuran *inflation* pada *first layer height* > dipilih 20 lapisan untuk *maximum layers* > klik *generate* untuk memulai proses meshing. Bentuk dari *mesh* pada domain fluida dapat dilihat pada Gambar 10.

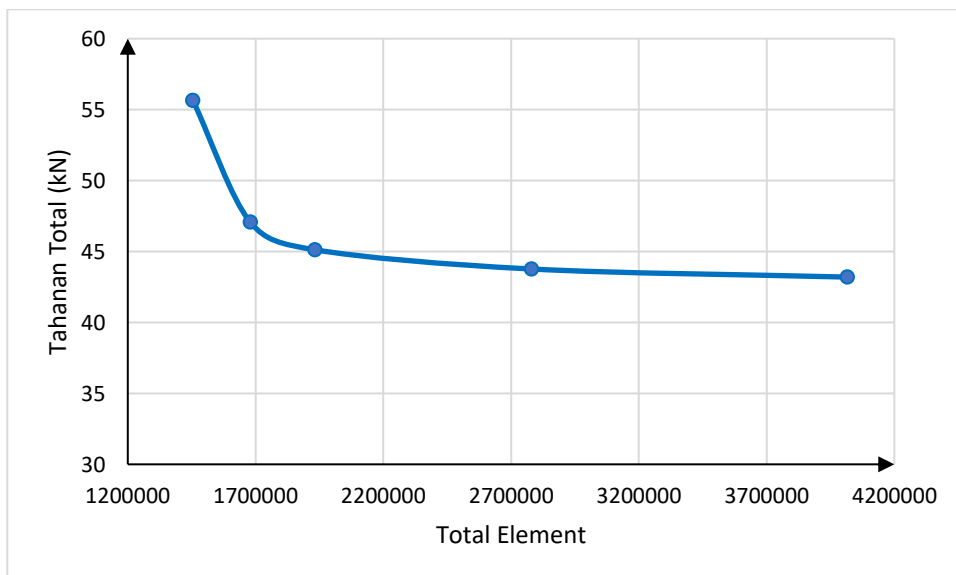


Gambar 10 *Mesh* pada domain fluida

Setelah melakukan *mesh* penting untuk mengetahui tentang *mesh independence study*, umumnya semakin kecil ukuran *mesh* akan semakin banyak jumlah elemen dan semakin halus bentuk *mesh* yang dihasilkan dan sebaliknya jika semakin besar ukuran *mesh* akan semakin sedikit jumlah elemen dan semakin kasar bentuk *mesh* yang dihasilkan. Namun, semakin banyak jumlah elemen pada *mesh* akan memakan banyak waktu dan daya computer yang besar. Pada penelitian yang dilakukan oleh Rosmani et al. (2024) *mesh independence study* merupakan langkah verifikasi untuk memastikan bahwa hasil simulasi tetap konsisten meskipun dilakukan perubahan pada pengaturan *mesh*, seperti ukuran elemen dengan tujuan untuk membuktikan bahwa kualitas hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh variasi *mesh* yang digunakan. Untuk memastikan hasilnya tidak bergantung pada *mesh*, simulasi numerik atau simulasi *CFD* dilakukan dengan menggunakan tiga *mesh* dengan jumlah elemen yang berbeda (Wang et al., 2020). Pada penelitian ini dilakukan *mesh independence study* kapal patroli tipe *planing hull* pada kecepatan *service* kapal 15 knot dengan menggunakan lima *grid* dengan jumlah elemen yang berbeda yaitu *fine*, *medium*, *coarse 1*, *coarse 2*, *coarse 3* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Mesh independence study

Detail	Fine	Medium	Coarse 1	Coarse 2	Coarse 3
Jumlah elemen	4016132	2780673	1931528	1680107	1454680
Tahanan total R_{tot} (kN)	43,1963	43,7644	45,1235	47,0517	55,6589
Tahanan total Eksperimen (kN)	43,0680	43,0680	43,0680	43,0680	43,0680
Selisih %	-0,2979	-1,6170	-4,7727	-9,2497	-29,2349



Gambar 11 Grafik mesh independence study

Berdasarkan pada Tabel 5 dan Gambar 11 semakin banyak jumlah *mesh* yang dihasilkan maka selisih tahanan total semakin kecil dan sebaliknya semakin sedikit jumlah *mesh* yang dihasilkan maka nilai selisih tahanan semakin besar. Dapat dilihat juga berdasarkan Tabel di atas selisih antara *mesh fine*, *medium* dan *coarse 1* tidak terlalu besar dan dibawah nilai 5% sehingga jumlah elemen dapat digunakan dalam proses simulasi *CFD*.

- Tahap *setup*

Setelah proses dari *mesh*, tahap selanjutnya adalah tahap *setup*. *Setup* merupakan proses untuk mengatur dan menentukan parameter yang berkaitan dengan simulasi. Tahap *setup* terdiri dari *setup flow analysis*, *solver* dan *materials*. Untuk mengatur *setup flow analysis* dapat dilihat pada Tabel 6-9.

Tabel 6 Analysis type

Parameter	Keterangan
<i>Basic option</i>	<i>Transient</i>

<i>Time duration</i>	<i>Total time 20 (s)</i>
<i>Time steps</i>	<i>Time step 0,01 (s)</i>
<i>Initial time</i>	<i>Time 0 (s)</i>

Tabel 7 Domain fluida

Parameter	Keterangan
<i>Fluid and particle definition</i>	<i>Air dan udara</i>
<i>Morphology</i>	<i>Continuous fluid</i>
<i>Refrence pressure</i>	<i>1 (atm)</i>
<i>Buoyancy model</i>	<i>Buoyant</i>
<i>Ref. location</i>	<i>Automatic</i>
<i>Domain motion</i>	<i>Stationary</i>
<i>Mesh deformation</i>	<i>Regions of motion specified</i>
<i>Displacement rel. to</i>	<i>Previous mesh</i>
<i>Multiphase</i>	<i>Homogeneous model</i>
<i>Free surface model</i>	<i>None</i>
<i>Turbulance</i>	<i>Shear Stress Transport</i>
<i>Interphase transfer</i>	<i>Mixture model</i>

Tabel 8 Identitas boundary fluida

Nama boundary	Boundary type	Boundary condition
<i>Inlet</i>	<i>Velocity</i>	<i>Inlet</i>
<i>Outlet</i>	<i>Static pressure</i>	<i>Outlet</i>
<i>Side</i>	<i>Free slip wall</i>	<i>Wall</i>
<i>Top</i>	<i>Free slip wall</i>	<i>Wall</i>
<i>Bottom</i>	<i>Free slip wall</i>	<i>Wall</i>
<i>Symmetry</i>	<i>-</i>	<i>Symmetry</i>
<i>Ship</i>	<i>No slip wall</i>	<i>Wall</i>

Tabel 9 Initialization

Parameter	Keterangan
<i>Velocity type</i>	<i>Cartesian</i>
<i>Cartesian velocity components U</i>	<i>7,71; 9,00; 10,28; 12,86; 15,43 (ms⁻¹)</i>
<i>Cartesian velocity components V</i>	<i>0 (ms⁻¹)</i>
<i>Cartesian velocity components W</i>	<i>0 (ms⁻¹)</i>
<i>Turbulance</i>	<i>Intensity and length scale</i>
<i>Fractional intensity</i>	<i>Autommatic</i>
<i>Eddy length scale</i>	<i>Automatic</i>
<i>Fluid volume fraction udara</i>	<i>CEL AirVOF</i>

Pada penelitian ini untuk *CFX Expressions Language (CEL)* yang digunakan pada Tabel 9 berdasarkan penelitian Zhang dan KIM (2015) sebagai metode penentuan *volume fraction* pada domain fluida sebagai *free surface* atau batas antara fluida air dan udara yang dapat ditambahkan pada pengaturan setup *expressions CFX*, untuk fluida udara $CEL\ AirVOF = \text{step}((z-Draft)/1[m])$, untuk fluida air $CEL\ WaterVOF = 1 - \text{step}((z-Draft)/1[m])$. Untuk mengatur *setup solver* dapat dilihat pada Tabel 10-11.

Tabel 10 Solver control

Parameter	Keterangan
<i>Advection scheme</i>	<i>High resolution</i>
<i>Transient scheme</i>	<i>Second order backward euler</i>
<i>Time step initialization</i>	<i>Automatic</i>
<i>Turbulence numerics</i>	<i>First order</i>
<i>Residual type</i>	<i>RMS</i>
<i>Residual target</i>	<i>0,0001</i>
<i>Advanced options</i>	<i>Multiphase control</i>
<i>Initial volume fraction smoothing</i>	<i>Volume-weighted</i>

Tabel 11 Output control

Parameter	Keterangan
<i>Results</i>	<i>Standard</i>
<i>Transient</i>	<i>Select variables: density, pressure, velocity, yplus, air density, air velocity, air volume fraction, water density, water velocity, water volume fraction</i>
<i>Output frequency</i>	<i>Every timestep</i>

Untuk mengatur *setup material* pada simulasi yang menggunakan 2 fluida yaitu fluida air dan udara perlu untuk mengatur properti sifat-sifat dari fluida udara dan air berupa *molar mass* dan *density*, pada penelitian ini fluida yang digunakan adalah air laut, untuk pengaturan *setup material* dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12 Setup materials

Parameter	Keterangan
Water molar mass	18,02 (kgkmol ⁻¹)
Water density	1025 (kgm ⁻³)
Air molar mass	28,96 (kgkmol ⁻¹)
Air density	1,185 (kgm ⁻³)

- Tahap *solution*

Setelah tahap dari *setup* telah dilakukan, maka simulasi akan memasuki tahap *solution*, dimana tahap ini untuk memulai proses simulasi berdasarkan parameter yang ada pada tahap *setup* yang telah dilakukan dan proses ini melibatkan iterasi. Tahap ini melakukan pemecahan masalah dengan menggunakan persamaan dasar dinamika pada *computational fluid dynamic (CFD)* dalam model simulasi.

- Tahap *result*

Setelah proses *running* dilakukan, selanjutnya tahapan *result* dimana tahapan ini merupakan tahap akhir dari simulasi yang akan menampilkan hasil simulasi. Selain itu tahap ini akan menampilkan visualisasi aliran model, kontur dan lain sebagainya.

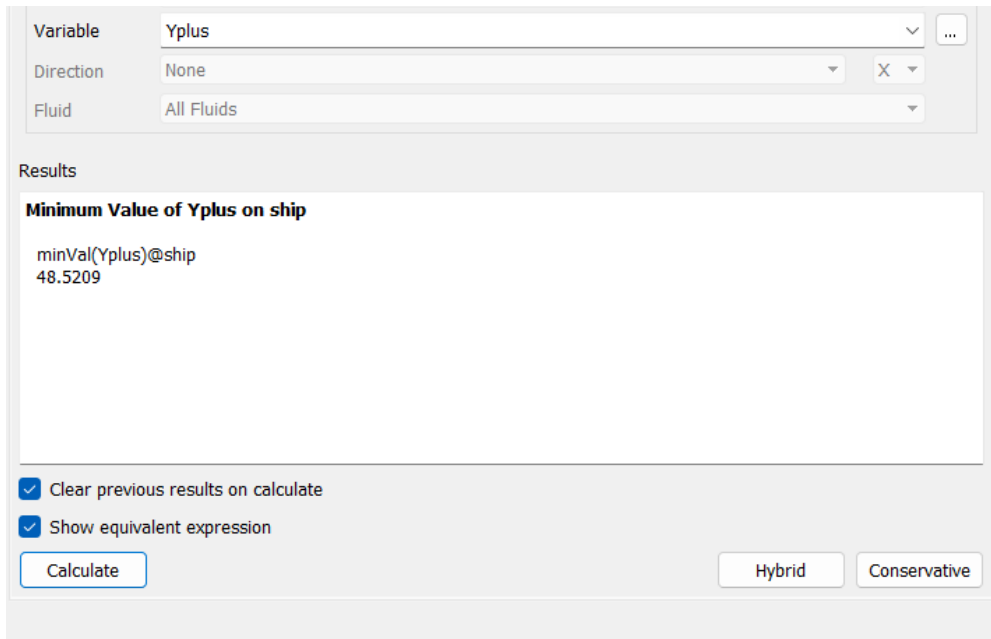
Setelah nilai tahanan didapatkan maka selanjutnya penting untuk memperhatikan validasi *wall function* dalam simulasi *CFD*. Frisk dan Tegehall (2015) pada lapisan batas, gradient variabel aliran pada arah normal umumnya sangat besar dibandingkan dengan aliran bebas, hal ini menunjukkan bahwa resolusi spasial diperlukan untuk menangkap efek-efek yang ada di dekat dinding (*wall*), metode yang umum digunakan untuk mengatasi kebutuhan penyelesaian model dengan ketelitian yang tinggi menggunakan fungsi dinding (*wall function*), *wall function* diterapkan ketika model turbulensi yang digunakan pada simulasi tidak valid di dekat dinding. Menurut ITTC Practical Guidelines for Ship CFD Applications 2011 jarak estimasi untuk nilai *Wall y+* antara $30 < y^+ < 100$, estimasi ini harus didasarkan pada perkiraan *skin friction* sebagai fungsi bilangan *reynold* (Re), jarak ini dijelaskan dalam istilah parameter non-dimensional y^+ . Nilai *Wall y+* dapat didefinisikan dalam istilah bilangan *reynold* dari aliran dengan menggunakan persamaan berikut:

$$y/L_{pp} = y^+ / (Re \sqrt{C_f/2}) \quad (2.1)$$

Dimana y adalah tebal layer pertama, L_{pp} adalah *length between the perpendiculars*, Re adalah bilangan *reynold*, C_f adalah koefisien *skin friction* dan y^+ adalah jarak antara cell grid pertama dengan dinding (*wall*) pada kapal. Untuk menghitung nilai bilangan *reynold* dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Re = \rho U L_{pp} / \mu \quad (2.2)$$

Dimana ρ dan μ adalah massa jenis dan viskositas dinamik fluida, dan U adalah kecepatan kapal. Nilai *Wall y+* pada simulasi pada kecepatan *service* 15 knot dapat di lihat pada Gambar 12.



Gambar 12 *Wall y+* pada simulasi kecepatan *service* 15 knot

2.6 Hasil dan Pembahasan

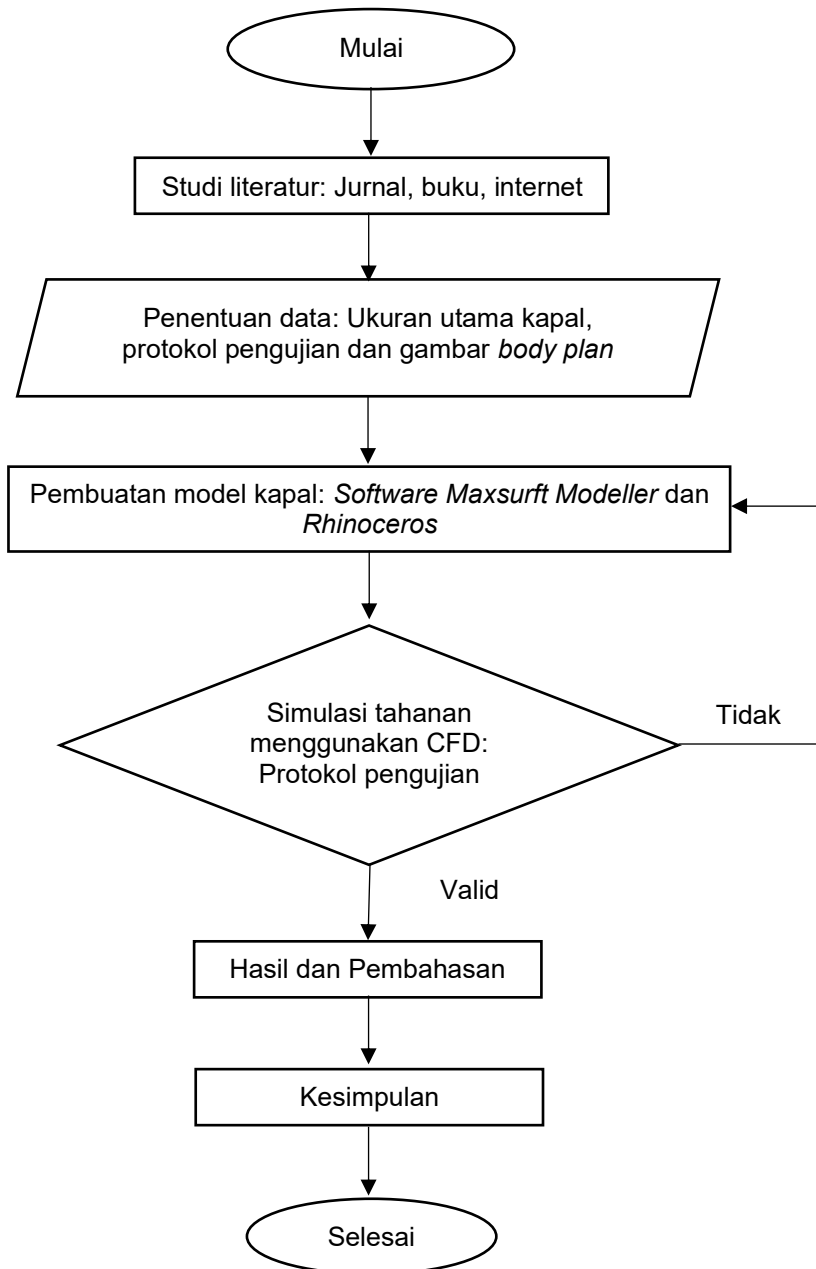
Setelah proses validasi dilakukan selesai, langkah selanjutnya adalah menganalisa dan membahas hasil simulasi. Analisis hasil dilakukan untuk memperkirakan *output* dari simulasi yang dilakukan. Adapun *output* dari hasil simulasi untuk memperlihatkan besarnya nilai drag, lift serta tahanan total kapal pada setiap variasi kedalaman perairan dengan kondisi kecepatan kapal yang berbeda serta melakukan validasi, untuk menguji keakuratan hasil simulasi yang telah dilakukan.

2.7 Kesimpulan

Setelah semua proses telah dilakukan maka selanjutnya menyimpulkan hasil penelitian yang sesuai dengan rumusan masalah dan tujuan penelitian yang telah diuraikan pada bab 1.

2.8 Diagram Alir Penelitian

Gambar 13 menampilkan tahapan analisis secara sistematis yang merupakan rangkuman seluruh rangkaian atau proses mencari nilai tahanan total dan nilai *wall y+* simulasi *CFD* menggunakan *ANSYS CFX 2021 R2*.



Gambar 13 Diagram alir penelitian