

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mendapatkan hambatan minimum adalah salah satu isu penting dalam mendesain kapal. Ada banyak cara yang dapat dilakukan termasuk dengan mengoptimalkan lambung kapal atau memilih jenis/tipe lambung yang berbeda. Perancangan kapal merupakan salah satu aspek paling penting dalam dunia maritim karena menentukan tidak hanya kemampuan operasional kapal, tetapi juga efisiensi energi dan dampak lingkungannya. Seiring berkembangnya teknologi dan meningkatnya kebutuhan transportasi laut, desain kapal terus mengalami perubahan guna menyesuaikan dengan tuntutan pasar, efisiensi ekonomi, dan peraturan internasional. Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi desain kapal mengalami lonjakan pada tahun 1980-an, diikuti oleh fase penurunan perlahan selama dekade 1990-an dan 2000-an, lalu mengalami perbaikan kembali dalam periode waktu belakangan ini. Perkembangan efisiensi desain dipengaruhi oleh modifikasi pada bentuk lambung dan desain propeller [1].

Salah satu faktor utama yang sangat memengaruhi performa kapal adalah bentuk lambung (*hull form*). *Hull form* tidak hanya memengaruhi kapasitas muatan dan stabilitas kapal, tetapi juga berperan besar dalam menentukan besar kecilnya tahanan kapal saat beroperasi di air. Oleh karena itu, pengembangan bentuk lambung yang optimal menjadi fokus penting dalam desain kapal modern.

Pada tahap perancangan, desain lambung menjadi sangat krusial demi mendapatkan performa kecepatan kapal yang signifikan dengan hambatan seminimal mungkin. Khususnya kapal cepat. Kapal cepat memiliki kecepatan yang relatif lebih tinggi dibandingkan jenis kapal lainnya, karena dirancang sedemikian rupa untuk mengurangi tahanan sehingga dapat mencapai performa optimal. Oleh sebab itu, dalam proses perancangan lambung kapal cepat, analisis terhadap hambatan menjadi aspek penting yang harus diperhatikan. Umumnya, kapal cepat menggunakan jenis lambung *planing hull*, di mana saat melaju pada kecepatan tinggi, sebagian besar gaya angkatnya berasal dari tekanan hidrodinamik [2]. Secara umum, pengelompokan kapal didasarkan pada pola distribusi tekanan di bagian dasar lambung, yang terdiri atas tipe *displacement*, *semi-planing*, dan *planing*. Kapal *planing* memiliki karakteristik khas, di antaranya adanya tekanan dinamis pada bagian dasar lambung, serta fenomena seperti *slamming*, *porpoising*, perubahan *trim*, dan gerakan *heave* [3].

Pada umumnya, kapal cepat dapat diklasifikasikan ke dalam dua tipe bentuk dasar, yaitu *displacement hull* (*round bilge*) dan *planing hull* (*hard chine*). Pada kapal tipe *displacement hull* mempunyai bentuk lengkung pada daerah *bilge* dengan bentuk *buttock line* dan *water line* yang mendekati lurus serta mempunyai transom, sehingga biasa juga disebut sebagai *tipe round bilge*. Kapal tipe *planing hull* juga

disebut tipe *hard chine* pada kecepatan tinggi akan mengalami extra *dynamic lift*. Kapal tipe ini mempunyai bentuk *bottom* yang *flat* dengan sudut tajam. Pada kecepatan tinggi, desain *hard chine* pada lambung kapal memungkinkan terbentuknya tekanan dinamis positif di bagian bawah lambung, yang memberikan gaya angkat dan mengurangi kebutuhan gaya apung untuk menopang kapal. Hal ini menyebabkan area dasar lambung yang terendam air saat bergerak lebih kecil dibandingkan area basah dalam kondisi statis [4].

Kapal dengan bentuk lambung yang baik memberikan pengaruh terhadap hambatan yang ditimbulkan sehingga operasional kapal dan pergerakan kapal lebih baik pula. Perhitungan nilai hambatan kapal saat beroperasi juga penting karena berpengaruh terhadap besarnya kecepatan kapal yang diinginkan. Meningkatkan kecepatan menjadi salah satu tujuan utama dalam desain lambung *planing*, namun tantangan utamanya adalah hambatan yang ditimbulkan. Untuk mengurangi hambatan tersebut, *planing hull* umumnya dirancang dengan lambung berjenis *hard chine*, yang memungkinkan air terlepas dari permukaan lambung saat kapal melaju pada kecepatan tinggi [5].

Dalam tiga dekade terakhir, permintaan terhadap kapal katamaran mengalami pertumbuhan signifikan, terutama untuk keperluan kapal penumpang (*ferry*), kapal olahraga, kapal penelitian oseanografi, dan kapal penangkap ikan (*trawler*). Dibandingkan kapal berlambung tunggal (*monohull*), katamaran memiliki keunggulan utama berupa tata letak akomodasi yang lebih fleksibel, stabilitas melintang yang lebih baik, dan dalam beberapa kondisi mampu mengurangi tahanan atau kebutuhan daya mesin pada kecepatan tertentu [6].

Lambung katamaran, yang dikenal juga sebagai lambung ganda, memiliki dua lambung dengan bentuk yang identik. Kapal jenis ini umumnya digunakan untuk kapal penumpang berkecepatan tinggi, dan penggunaannya terus meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Menurut Papanikolaou [7], sekitar 34.1% kapal cepat yang beroperasi di dunia merupakan tipe katamaran. Meskipun demikian, berbagai upaya masih dilakukan untuk meningkatkan performa kapal ini, terutama dalam hal efisiensi bentuk lambung, pengurangan kebutuhan daya dorong, serta kemampuan beroperasi secara optimal di kondisi bergelombang.

Sejumlah upaya telah dilakukan para peneliti untuk meningkatkan kemampuan operasi kapal dengan lambung katamaran adalah dengan melakukan kajian sejumlah parameter yang dapat mempengaruhi karakteristik kapal, seperti halnya kecepatan kapal, bentuk lambung (*simetris* dan *asimetris*), jarak rentang antar lambung katamaran (*S/L*), pengaruh kedalaman dan lebar perairan operasi kapal serta pengaruh pemasangan *bulbous*.

Setyawan et al. [8] melalui hasil pengujiannya menyatakan bahwa kapal katamaran dengan rasio jarak antar lambung terhadap panjang kapal (*S/L*) antara

0.2 hingga 0.4 memiliki hambatan yang lebih kecil dibandingkan kapal monohull, baik dengan bentuk lambung *hard chine* maupun *round*, pada kecepatan 10 knot (F_n 0.478). Selain itu, untuk menurunkan hambatan dan meningkatkan kinerja *seakeeping* kapal, optimalisasi jarak antar lambung katamaran (S/L) menjadi salah satu cara yang efektif, sebagaimana dijelaskan oleh [9] dan [10].

Selain katamaran dengan lambung simetrik saat ini telah pula dikembangkan katamaran dengan lambung asimetrik, Jamaluddin et al. [11] menuliskan sebuah kajian secara eksperimental pengaruh bentuk lambung katamaran (simetrik dan asimetrik) terhadap pengurangan tahanan total kapal, khususnya pada rentang S/L = 0.2 s.d 0.4 dan rentang F_n = 0.19 s.d 0.65. Berdasarkan pengujiannya tersebut menunjukkan bahwa katamaran dengan lambung asimetrik memiliki tahanan total (C_T) yang lebih rendah dibanding kapal katamaran dengan lambung simetrik pada setiap rentang F_n yang diuji. Selanjutnya pada paper yang sama menjelaskan pula pengaruh staggered (R/L) terhadap tahanan total kapal katamaran pada kedua bentuk lambung (simetrik dan asimetrik), hasilnya menunjukkan bahwa katamaran dengan lambung asimetrik memiliki tahanan total (C_T) yang lebih rendah dibanding dengan lambung simetrik.

Jamaluddin et al. [12] menuliskan sebuah kajian secara numerik dan eksperimental pengaruh jarak rentang antar lambung (S/L) kapal katamaran (lambung simetrik dan asimetrik) terhadap pengurangan tahanan total kapal pada rentang S/L = 0.2 s.d 0.4 dengan rentang F_n = 0.19 s.d 0.65. Berdasarkan eksperimen dan analisa CFD yang dilakukannya menunjukkan bahwa penurunan tahanan total terjadi seiring dengan penambahan lebar jarak antar lambung katamaran, selanjutnya tahanan total yang dihasilkan kapal katamaran dengan lambung asimetrik memiliki tahanan yang lebih rendah dibanding katamaran dengan lambung simetrik, perbedaaan yang sangat signifikan terjadi utamanya pada rentang F_n = 0.4 s.d 0.5, menurutnya hal tersebut terjadi dikarenakan pengaruh interaksi antar badan kapal katamaran.

Papanikolaou [7] menuliskan sebuah kajian secara numerik dan eksperimental pengaruh bentuk lambung asimetrik terhadap pengurangan tahanan kapal dan peningkatan kualitas pergerakan kapal pada gelombang (*seakeeping*). Papanikolaou menyimpulkan dengan cara mengoptimalkan jarak rentang antar lambung katamaran dapat memperbaiki karakteristik hidrodinamik kapal, khususnya terhadap tahanan total kapal. Pada kecepatan rendah, kapal katamaran dengan lambung asimetrik menghasilkan *wake wash* yang rendah [13]. Dengan kualitas gelombang yang dihasilkan lebih kecil, hal tersebut dapat mengurangi terjadinya bahaya erosi pada daerah perairan dimana kapal tersebut dioperasikan. Penelitian tentang kapal katamaran hingga saat ini masih terus berkembang dan didiskusikan dalam forum ilmiah. Koefisien hidrodinamika katamaran asimetrik diteliti oleh Muhammad A. H dan yasukawa [14], adapun Sahoo et al. membandingkan hambatan katamaran tipe *round* dan *chine* terhadap berbagai metode perhitungan tahanan diteliti [15]. Fitriadhy

et al. [16] mengoptimalkan bentuk lambung katamaran untuk mengurangi hambatan total kapal dengan menggunakan teknik CFD.

Salah satu cara, untuk mencapai efisiensi performa kapal adalah dengan memodifikasi bentuk lambung kapal. Adapun kapal katamaran, yaitu; asimetrik *inside flat* dan asimetrik *outside flat*, dimana tipe *outside flat* lebih unggul dalam tahanan tambahan pada gelombang [17]. Penampang *body plan* katamaran umumnya dibagi dua jenis yaitu; bentuk lambung *hard chine* dan *round bilge* dengan upaya meningkatkan gaya *lift* dan mengurangi gesekan antara air dan lambung. Dengan kecilnya badan kapal yang bersentuhan dengan air maka hambatan yang ditanggung juga kecil [18]. Salah satu tahapan dalam perancangan kapal adalah perhitungan tahanan total kapal. Katamaran memberikan fenomena yang menarik untuk dikaji dan diteliti lebih lanjut pada aspek hambatannya.

Katamaran bentuk lambung *hard chine* memiliki luas permukaan basah yang lebih besar, yang diperkirakan akan meningkatkan gaya hambat gesekan. Namun, pada kecepatan yang lebih tinggi, bentuk ini menghasilkan gaya angkat yang lebih dinamis sehingga luas permukaan basah dapat berkurang. Sebaliknya, bentuk lambung *round bilge* mungkin menunjukkan keseimbangan dinamis yang besar pada kecepatan tinggi, yang disertai dengan peningkatan *resistance*. Oleh karena itu, bentuk lambung *round bilge* lebih disukai untuk kapal yang berbobot lebih berat dan lebih lambat, sedangkan untuk *hard chine* digunakan pada kapal katamaran yang berbobot lebih ringan dan berkecepatan lebih tinggi [19].

Seiring kemajuan teknologi di bidang komputasi, telah dikembangkan metode prediksi performa kapal yang lebih fleksibel, yaitu dengan memanfaatkan Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD memiliki kemampuan untuk memperkirakan tahanan kapal dengan tingkat ketelitian yang tinggi serta memungkinkan studi dan analisis pada sistem yang sulit diuji menggunakan metode eksperimen konvensional [20].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penelitian ini akan membahas **“Hidrodinamika Kapal Katamaran Asimetrik Tipe Planing Hull Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic”**. Diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan efek yang signifikan terhadap penelitian kapal katamaran.

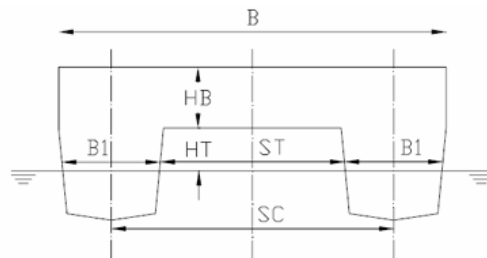
1.2 Teori

Dalam mengerjakan penelitian ini digunakan teori dasar yang mendukung penelitian agar sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, sebagaimana landasan teori yang relevan dengan prediksi hambatan serta simulasi numerik yang dilakukan dalam penelitian ini. Pembahasan diawali dengan tinjauan mengenai kapal katamaran, jenis katamaran, kapal cepat, *planing hull*, konsep dasar hambatan kapal. Terakhir, dijelaskan metode numerik seperti pemodelan turbulensi dan metode

volume of fluid (VOF) serta gerakan benda padat (rigid body motion) dan sistem koordinat pada sumbu yang diaktifkan.

1.2.1 Kapal Katamaran

Katamaran merupakan jenis kapal yang memiliki dua lambung terpisah yang dihubungkan oleh struktur geladak atau *bridging platform* di bagian tengahnya. Struktur penghubung ini dirancang berada di atas permukaan air sehingga dapat meminimalkan terjadinya *slamming* dan *deck wetness*. Selain itu, luas permukaan lambung yang tercelup air relatif lebih kecil dibandingkan kapal *monohull*, sehingga menghasilkan sarat yang lebih rendah. Bentuk garis air lambung yang ramping juga berkontribusi dalam mengurangi hambatan kapal saat beroperasi. Penentuan tinggi struktur atas kapal terhadap permukaan air umumnya disesuaikan dengan karakteristik tinggi gelombang pada rute pelayaran yang dilalui. Kombinasi antara luas geladak yang besar dan bobot kosong kapal yang relatif ringan menjadikan katamaran sangat sesuai untuk transportasi antar kota maupun kegiatan pariwisata.

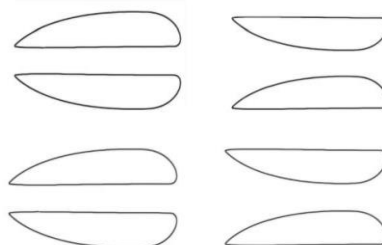


Gambar 1. Nomenklatur katamaran
Sumber: (Parsons, 2003)

1.2.2 Model Lambung Katamaran

Model lambung katamaran, secara umum terdapat tiga bentuk dasar dapat dilihat pada Gambar 2. pada hal-hal berikut:

1. Katamaran simetris
2. Katamaran asimetrik *inside flat* (IF)
3. Katamaran asimetrik *outside flat* (OF)



Gambar 2. Model lambung katamaran *inside flat* (IF) dan *outside flat* (OF)
Sumber: (Ikezoe, S; Hirata, N; Yasukawa, H., 2014)

1.2.3 Penampang Body Plan Katamaran

Secara umum penampang *body plan* katamaran dibedakan menjadi dua, dapat dilihat pada Gambar 3. yaitu:

1. Hard Chine
2. Round Bilge



Gambar 3. Penampang *body plan* katamaran

Bentuk lambung *hard chine* memiliki geometri yang relatif sederhana sehingga lebih mudah dalam proses konstruksi. Secara karakteristik, tipe lambung ini memiliki luas permukaan basah statis yang cenderung lebih besar, sehingga berpotensi meningkatkan hambatan gesek (*frictional drag*) pada kecepatan rendah. Namun, pada kecepatan yang lebih tinggi, luas permukaan basah tersebut akan berkurang secara alami akibat timbulnya gaya angkat dinamis (*dynamic lift*), sehingga sebagian lambung terangkat dari permukaan air dan hambatan gesek dapat menurun.

Lambung tipe *round bilge* umumnya lebih sesuai untuk kapal dengan kapasitas muatan besar dan operasi pada kecepatan rendah. Tipe lambung ini memiliki karakteristik gerak yang relatif lebih stabil serta tidak mudah mengalami *slamming*, sehingga mampu memberikan tingkat kenyamanan yang lebih baik, terutama pada kondisi gelombang yang cukup tinggi. Selain itu, lambung jenis ini biasanya dilengkapi dengan perangkat *spray* di bagian haluan (*bow*) untuk mengurangi efek percikan dan sibakan air (*water spray*) selama kapal beroperasi.

1.2.4 Planing Hull

Kapal dengan tipe *planing hull* merupakan salah satu jenis kapal cepat yang memiliki tingkat efisiensi tinggi. Jenis kapal ini memanfaatkan kecepatan untuk menghasilkan gaya angkat hidrodinamik, yang mampu mengangkat sebagian lambung kapal keluar dari air. Semakin kecil bagian lambung yang bersentuhan dengan air, semakin kecil pula tahanan yang dialami. Desain lambung kapal mengikuti prinsip-prinsip hidrodinamika, di mana setiap benda yang bergerak dan menciptakan aliran asimetris akan menghasilkan gaya angkat yang arahnya tegak lurus terhadap arah gerak [21].

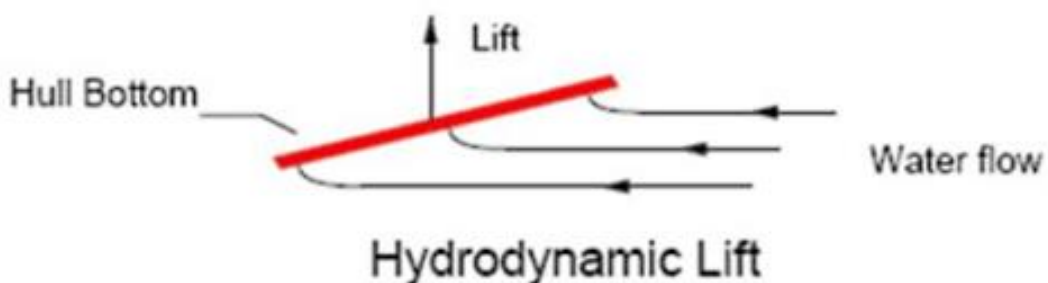
1.2.5 Konsep Dasar Hambatan Kapal

Hambatan kapal adalah gaya fluida yang muncul akibat interaksi antara kapal dan fluida, yang bekerja berlawanan arah dengan pergerakan kapal. Ketika sebuah kapal diamati saat bergerak, terdapat dua jenis aliran utama yang dapat terlihat, yaitu pola gelombang (wave pattern) yang mengikuti gerakan lambung, serta aliran turbulen yang terbentuk di sepanjang lambung dan memanjang menjadi *wake* di bagian belakang kapal [22].

1.2.6 Hidrodinamika Kapal *Planing Hull*

Menurut Muhammad, A. H. [23] penelitian mengenai hidrodinamika kapal tipe *planing hull* telah dimulai di Amerika Serikat sekitar empat dekade yang lalu. Pada awalnya, riset ini ditujukan untuk merancang *aircraft* atau *flying boat* yang menggunakan air sebagai media pendaratan. Seiring perkembangan teknologi, konsep tersebut kemudian diterapkan dalam perancangan lambung kapal berkecepatan tinggi yang dikenal dengan istilah *planing hull*.

Secara umum, lambung kapal dengan tipe *planing hull* beroperasi dengan kondisi *trim* di buritan, yaitu haluan terangkat sementara buritan tenggelam lebih dalam akibat bentuk dasar yang rata. Gambar 4 memperlihatkan gaya hidrodinamika yang bekerja mendorong lambung kapal keluar dari permukaan air [24].



Gambar 4 Daya angkat hidrodinamis lambung kapal tipe *planing hull*

Sumber: (Elaghbash, A O., 2021)

1.2.7 Non-Dimensi Gaya Hidrodinamika

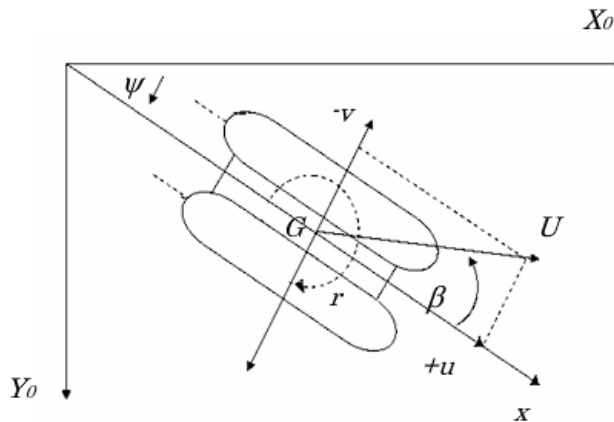
Setup dan sistem koordinat yang digunakan dalam pengujian ditampilkan pada Gambar 5. Pengukuran gaya dan momen hidrodinamik (X^*_H, Y^*_H, N_H) yang bekerja pada model didasarkan pada Persamaan 1 dan 2 [25] [26] dalam bentuk non-dimensi. Dimana efek massa virtual ditambahkan kemudian ke gaya longitudinal dan lateral yang diukur yang menghasilkan tahanan kapal atau koefisien hidrodinamik gaya X (X'_o).

$$X^*_H, Y^*_H = \frac{X^*_H, Y^*_H}{1/2\rho LppdU^2} \quad (1)$$

$$N^*_H = \frac{N^*_H}{1/2\rho Lpp^2dU^2} \quad (2)$$

Keterangan:

U = Kecepatan kapal ($U = \sqrt{u^2 + v^2}$)



Gambar 5 Sistem koordinat

Sumber: (Muhammad, Andi Haris; Yasukawa, H., 2009)

1.2.8 Free Water Surface dan Metode Volume of Fluid

Dalam mensimulasikan pergerakan lambung kapal pada media air dan udara, diperlukan model numerik yang mampu merepresentasikan interaksi serta antarmuka antara kedua fluida tersebut. Berbagai model dua-fase dapat digunakan untuk tujuan ini, namun metode yang paling umum diterapkan dalam analisis hidrodinamika kapal adalah metode *Volume of Fluid* (VOF). Metode VOF bekerja dengan melacak distribusi fraksi volume dari masing-masing fase dalam setiap sel komputasi, sehingga batas antara air dan udara dapat teridentifikasi secara numerik. Metode ini dinilai relatif sederhana dalam implementasinya serta cukup akurat dalam menangkap fenomena permukaan bebas (*free surface*), sehingga banyak digunakan dalam simulasi CFD pada analisis kapal.

Untuk kapal yang bergerak di permukaan air, interaksi antara air dan udara memainkan peran penting dalam membentuk pola aliran dan tahanan yang dihasilkan. Untuk memodelkan efek tersebut dalam simulasi numerik, digunakan metode *volume of fluid* (VOF). Metode VOF adalah teknik numerik yang melacak dan merepresentasikan antarmuka antara fluida yang tidak saling bercampur, seperti air dan udara. Metode ini bergantung pada fraksi volume (α), yang menentukan proporsi suatu fluida dalam setiap sel komputasi. Berdasarkan nilai fraksi volume tersebut, suatu sel dapat diidentifikasi sebagai berisi satu fluida, fluida lainnya, atau antarmuka

di antara keduanya [27]. Walau tidak sekokoh dan akurat pada metode level-set, namun tingkat penggunaan sumber daya komputasinya lebih rendah [28].

1.2.9 Model Turbulen

Model turbulensi merupakan sekumpulan persamaan tambahan pada RANS yang digunakan untuk memprediksi dan memodelkan aliran turbulen dengan lebih akurat. Konsep dasar dari model transport turbulensi berawal dari pemodelan *reynolds stress* pada aliran rata-rata terhadap waktu [29]. Dalam pendekatan *linear eddy viscosity* pada RANS, model turbulensi dibagi menjadi empat jenis utama, yaitu *zero-equation*, *half-equation*, *one-equation*, dan *two-equation*. Di antara keempatnya, model *two-equation* paling umum digunakan karena dianggap memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan model turbulensi RANS lainnya.

Model *two-equations* merupakan jenis model turbulensi yang menyelesaikan dua persamaan transport yang mewakili besaran-besaran turbulen. Karena memiliki dua variabel utama, model ini dianggap lebih lengkap dan mampu memprediksi perilaku aliran turbulen tanpa memerlukan informasi awal mengenai struktur turbulensinya. Beberapa model *two-equations* yang paling sering digunakan meliputi model *k- ϵ* , *k- ω* , serta *k- ω shear stress transport (SST)*.

Model *k- ϵ standar* merupakan salah satu model turbulensi yang paling banyak digunakan dan dijadikan acuan dalam berbagai penelitian. Model *two-equations* ini pertama kali dikembangkan oleh Launder dan Sharma, dan menjadi dasar bagi pengembangan berbagai model turbulensi *two-equations* lainnya. Dalam model *k- ϵ standar*, persamaan transport memanfaatkan dua variabel utama, yaitu *turbulence kinetic energy (k)* yang merepresentasikan energi dalam turbulensi, serta *turbulence dissipation rate (ϵ)* yang menggambarkan tingkat disipasi energi kinetik turbulen [30]. Model ini mampu memberikan hasil prediksi yang baik untuk aliran bebas dengan gradien tekanan rendah. Namun demikian, model *k- ϵ standar* memiliki keterbatasan dalam menggambarkan fenomena *wake* di belakang kapal yang sedang bergerak [31].

Model *k- ω* yang dikembangkan oleh Wilcox didasarkan pada dua persamaan transport, yaitu *turbulence kinetic energy (k)* dan *specific dissipation rate (ω)*, yang menggambarkan karakteristik frekuensi dari turbulensi. Kedua persamaan tersebut berfungsi serupa dengan yang digunakan pada model *k- ϵ standar*. Model *k- ω* memiliki keunggulan dalam memprediksi aliran turbulen di dekat permukaan dinding serta pada area dengan tingkat turbulensi rendah. Namun, kelemahan utama model ini terletak pada sensitivitasnya terhadap kondisi batas, kondisi awal, serta kualitas *mesh* yang digunakan [32].

Untuk menggabungkan keunggulan dari model *k- ϵ* dan *k- ω* , Menter [33] mengembangkan model *Shear Stress Transport (SST)* dengan memadukan kedua

model tersebut melalui fungsi pencampuran (blending function). Dalam model hibrida ini, pendekatan $k-\omega$ digunakan pada wilayah lapisan batas dekat dinding, sedangkan formulasi $k-\varepsilon$ (yang dikonversi ke bentuk $k-\omega$) diterapkan pada daerah aliran bebas. Model $k-\omega$ SST terbukti memiliki kinerja yang sangat baik dalam menangani berbagai jenis aliran kompleks, seperti aliran dengan gradien tekanan tinggi dan aliran yang mengalami pemisahan, di mana model $k-\varepsilon$ maupun $k-\omega$ konvensional sering menunjukkan deviasi yang signifikan terhadap hasil eksperimen. Secara umum, model ini dikenal memiliki performa yang andal dan menjadi salah satu model turbulensi yang paling banyak digunakan dalam simulasi analisis hidrodinamika kapal [34].

1.2.10 Lapisan Batas (Boundary Layer)

Kondisi batas (boundary conditions) diperlukan untuk menentukan keadaan awal dan kondisi batas dari variabel-variabel yang digunakan dalam persamaan pengendali (governing equations) serta model turbulensi. Pemilihan kondisi batas yang tepat sangat penting untuk memastikan penerapan fisik yang sesuai, akurasi perhitungan, serta waktu konvergensi yang efisien. Paragraf-paragraf berikut menjelaskan kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *velocity inlet*, *pressure outlet*, *wall*, *top*, dan *bottom*.

a. Kecepatan aliran masuk (velocity inlet)

Velocity inlet menentukan arah dan besarnya aliran yang masuk menuju ke objek (kapal). Untuk simulasi dinamis pada kapal, kecepatan aliran masuk dapat ditetapkan berdasarkan nilai kecepatan kapal yang digunakan dalam pengujian. Dalam penelitian ini, kecepatan kapal bervariasi yang digunakan sebagai nilai kecepatan aliran, di mana nilai tersebut terhadap karakteristik hidrodinamika kemudi tidak mengalami perubahan yang signifikan. Jika nilainya berada di bawah ambang tersebut, maka kecepatan aliran masuk dihitung berdasarkan kecepatan kapal yang digunakan pada data validasi pengujian [35].

b. Tekanan yang keluar (pressure outlet)

Kondisi *pressure outlet* digunakan untuk menentukan tekanan statis pada batas keluaran aliran, yang nilainya disamakan dengan tekanan statis lingkungan tempat aliran keluar. Tekanan statis ini diasumsikan konstan dan bernilai tekanan atmosfer pada sisi keluaran. Selain itu, posisi *outlet* harus ditempatkan cukup jauh dari area utama yang menjadi fokus analisis untuk mencegah terjadinya *back flow* (aliran balik), karena fenomena tersebut dapat memengaruhi akurasi hasil simulasi [35].

c. Dinding batas (wall)

Dalam simulasi numerik yang dilakukan pada penelitian ini, pemodelan aliran di sekitar batas padat harus dilakukan secara akurat untuk memperoleh prediksi yang andal terhadap tegangan geser dinding (wall shear stress) dan hambatan. Untuk

menghitung tegangan geser tersebut, profil kecepatan di dekat dinding harus diketahui. Namun, untuk menyelesaikan seluruh lapisan batas secara langsung diperlukan *mesh* yang sangat halus di dekat permukaan, terutama pada bilangan *reynolds* yang tinggi. Untuk menghindari kebutuhan *mesh* yang sangat rapat di daerah dinding, biasanya digunakan fungsi dinding (*wall functions*). Fungsi ini memperkirakan kecepatan aliran di dekat dinding berdasarkan hubungan empiris, sehingga memungkinkan penggunaan *mesh* yang lebih kasar di area dekat dinding [27].

Ketika fungsi dinding standar diterapkan, sel *mesh* pertama harus ditempatkan di dalam lapisan logaritmik yang sesuai dengan $30 < y^+ < 300$, jika y berada di bawah rentang ini, asumsi di balik fungsi dinding menjadi tidak valid [27].

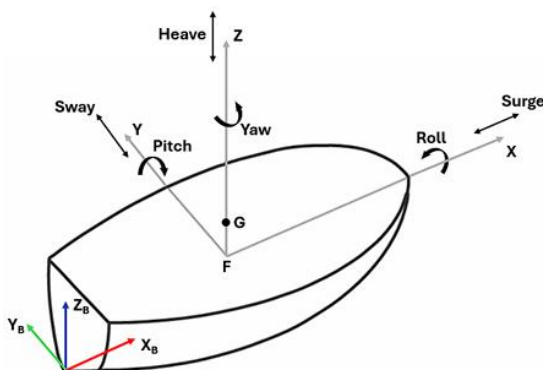
Kondisi *wall* menetapkan bahwa kecepatan tangensial fluida sama dengan kecepatan dinding, sedangkan kecepatan normal fluida bernilai nol. Dengan mempertimbangkan efek viskositas, aliran di dekat dinding secara umum dibagi menjadi tiga lapisan, yaitu lapisan laminar, lapisan transisi (*buffer layer*), dan lapisan turbulen. Jarak dinding tak berdimensi (*non-dimensional wall distance*, (y^+)) umumnya digunakan untuk menunjukkan tingkat kehalusan *mesh* pada lapisan batas. Setiap model turbulensi memiliki rentang nilai (y^+) yang berbeda dan sesuai untuk penerapannya, sehingga nilai (y^+) harus diperhatikan dengan cermat saat proses pembuatan *mesh*. Sebagai aturan umum, nilai (y^+) biasanya diatur sekitar 1 atau berada dalam rentang 30-200, tergantung pada struktur aliran turbulen yang ingin dimodelkan [35]. Lotfi melakukan penelitian untuk mendapatkan hasil yang akurat menggunakan nilai y^+ antara 50-150 [36]

Distribusi nilai y^+ pada permukaan lambung yang berada pada kisaran 30 hingga 300. Rentang nilai y^+ tersebut memberikan kemampuan yang baik bagi model turbulensi untuk memprediksi aliran di sekitar bentuk lambung secara akurat [24]. Adapun menurut ITTC y^+ kisaran 30-100 [37].

1.2.11 *Rigid Body Motion dan Coordinate System*

Sebuah kapal yang bergerak dalam ruang tiga dimensi mengalami enam mode gerakan independen yang dikenal sebagai enam derajat kebebasan (*six degrees of freedom/DoF*). Gerakan tersebut terdiri dari tiga gerakan translasi *surge*, *sway*, dan *heave*, dan tiga gerakan rotasi *roll*, *pitch*, serta *yaw*. Jenis-jenis gerakan ini ditunjukkan pada Gambar 6. Selain gerakan dinamis tersebut, terdapat pula dua jenis gerakan statis, yaitu *sinkage* dan *trim*. *Sinkage* mengacu pada pergeseran vertikal kapal secara konstan sepanjang sumbu z , sedangkan *trim* menggambarkan rotasi konstan kapal terhadap sumbu y yang menyebabkan perbedaan sarat antara haluan dan buritan.

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan satu kondisi, yaitu dengan gerakan badan kapal. Untuk konfigurasi di mana gerakan diaktifkan, lambung kapal dibiarkan bebas melakukan *trim* dan *sinkage*, yang masing-masing berkaitan dengan gerakan *pitch*. Titik asal sistem koordinat badan kapal dalam penelitian ini ditempatkan pada bagian *keel*, dan ditandai dalam gambar sebagai $((X_B, Y_B, Z_B))$. Namun, nilai *trim* dan *sinkage* dihitung pada pusat apung (centre of flotation, F), sedangkan pusat gravitasi kapal ditunjukkan dengan simbol G.



Gambar 6 Enam derajat kebebasan (six DoF) pada benda terapung
Sumber: (Ibrahim, R.; Grace, I. M., 2010)

Posisi dan gerakan kapal, termasuk *trim* dan *sinkage*, memengaruhi pola aliran air di sekitar lambung kapal. Efek-efek ini berdampak pada pola gelombang di permukaan air serta pola aliran bangun (wake) di belakang kapal.

Tabel 1 Setup *rigid body* dan *coordinate system ansys cfx*

Rotation rigid body	Translasi rigid body
Sumbu X = Rolling	Sumbu X = Surge
Sumbu Y = Pitch	Sumbu Y = Sway
Sumbu Z = Yaw	Sumbu Z = Heave

1.2.12 Mesh Generation dan Grid Independence

Mesh merepresentasikan model fisik dalam bentuk *cell*, di mana persamaan dasar dapat diselesaikan secara numerik. Untuk memperoleh hasil CFD yang andal, *mesh* harus cukup halus (refined) pada area yang memiliki gradien tinggi dari karakteristik fluida. Bagian ini membahas kegunaan berbagai jenis *mesh*. Dalam penelitian ini digunakan *mesh hibrida* (hybrid mesh), yang memiliki lapisan inflasi terstruktur (structured inflation layers) di sekitar kapal, dan sel tak terstruktur (unstructured cells) pada bagian domain lainnya. Mesh hibrida lebih mudah dibuat dan lebih cepat mencapai konvergensi dibandingkan *mesh* terstruktur sepenuhnya. Selain itu, *mesh* hibrida juga mampu mensimulasikan efek viskositas dengan lebih baik dibandingkan *mesh* tak terstruktur murni.

Hasil CFD harus independen terhadap resolusi *mesh*. Umumnya, penggunaan *mesh* yang lebih halus dapat meningkatkan akurasi perhitungan. Tidak melakukan uji independensi *mesh* (*mesh independence test*) merupakan salah satu sumber kesalahan yang paling umum dalam simulasi CFD. Strategi *meshing* yang sama hanya dapat diterapkan pada kasus dengan karakteristik yang serupa. Oleh karena itu, setidaknya satu studi konvergensi (*convergence study*) harus dilakukan untuk setiap kasus baru. Namun, *mesh* juga dapat menjadi terlalu halus secara berlebihan, yang justru menyebabkan pemborosan jumlah sel dan waktu komputasi.

1.2.13 Konsep *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Menurut Versteeg dan Malalasekera (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 [38]. Dalam Simulasi menggunakan CFD terdapat 3 proses, yaitu:

- a) *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.
- b) *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.
- c) *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 persamaan-persamaannya [20], yaitu sebagai berikut:

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

2. Persamaan Momentum

- Momentum ke arah sumbu x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \quad (4)$$

- Momentum ke arah sumbu y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My} \quad (5)$$

- Momentum ke arah sumbu z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz} \quad (6)$$

3. Persamaan Energi

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{ div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (7)$$

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) [39].

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perbandingan koefisien hidrodinamik gaya X (tahanan total) pada kecepatan 14.5 knot tiap jarak antar lambung (S/L) katamaran *round bilge* dan *hard chine*.
2. Mengetahui perbandingan koefisien hidrodinamik gaya X (tahanan total) pada seluruh kecepatan tiap jarak antar lambung (S/L) katamaran *round bilge* dan *hard chine*.
3. Mengetahui analisis perbandingan tahanan total katamaran asimetrik tipe *round bilge* dan *hard chine*.

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

1. Memberikan gambaran perbandingan nilai tahanan total untuk kapal katamaran asimetrik tipe lambung *round bilge* dan *hard chine*.
2. Memberikan informasi tentang pengaruh variasi konfigurasi antar lambung katamaran asimetrik *round* dan *hard chine*. Selain itu akan menambah database tentang kajian kapal katamaran.

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 selama 12 bulan yakni dari bulan April 2025 – April 2026.

2.2 Studi Literatur

Pada tahap ini, mengumpulkan teori-teori dasar, rujukan yang bersifat umum dan khusus. Kajian pustaka dilakukan guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap permasalahan yang dihadapi, sehingga dapat muncul dugaan-dugaan awal yang kemudian dirumuskan menjadi hipotesis. Studi literatur ini difokuskan pada teori dan konsep yang berkaitan dengan perhitungan nilai hambatan yang ditimbulkan oleh lambung yang telah didesain. Selanjutnya, dilakukan analisis terhadap hambatan dari nilai *drag force* yang dihasilkan.

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 2 berikut ini:

Tabel 2 Data kapal katamaran asimetrik

Parameter	Dimensi
Panjang garis tegak kapal (LPP)	28 (m)
Panjang garis air (LWL)	28.8 (m)
Luas bidang basah (m ²)	342.1 (m ²)
Volume (∇)	249.2 (m ³)
Lebar (B)	4 (m)
Tinggi (H)	3.34 (m)
Sarat (T)	1.7 (m)
Lebar Demi-Hull	11.6 (m)
Koefisien Blok (CB)	0.655

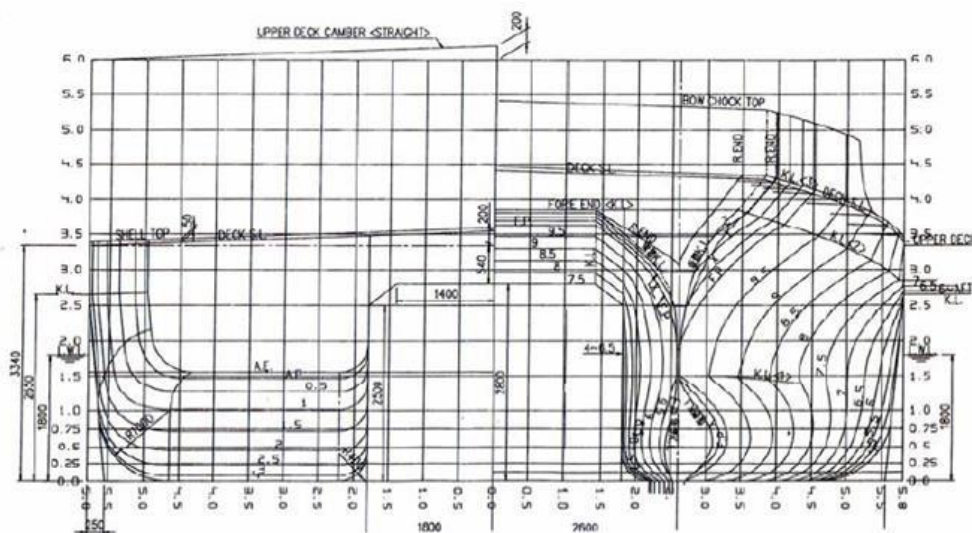
Sumber: (Muhammad, Andi Haris; Yasukawa, H., 2009)

Untuk melakukan simulasi CFD perlu menentukan protokol pengujian untuk mendapatkan nilai tahanan total kapal. Adapun data protokol pengujian berupa rasio jarak antar lambung (S/L) dan kecepatan kapal, sebagaimana Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3 Protokol pengujian

Parameter	Dimensi
Model	Katamaran asimetrik <i>inside flat</i>
Penampang	Katamaran <i>round bilge</i> dan <i>hard chine</i>
Kecepatan (knot)	10, 11.5, 13, 14.5, 16, 17.5 dan 19
Rasio jarak antar lambung	S/L = 11.6; S/L 10.2; S/L 13.0

Simulasi ini menggunakan simulasi dinamis dengan *free-surface* untuk mendapatkan hasil yang menyerupai hasil eksperimen. Selain data ukuran utama kapal dan protokol pengujian, diperlukan juga gambar *body plan* katamaran asimetrik untuk melakukan *re-modelling* dan modifikasi lambung kapal sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 7.

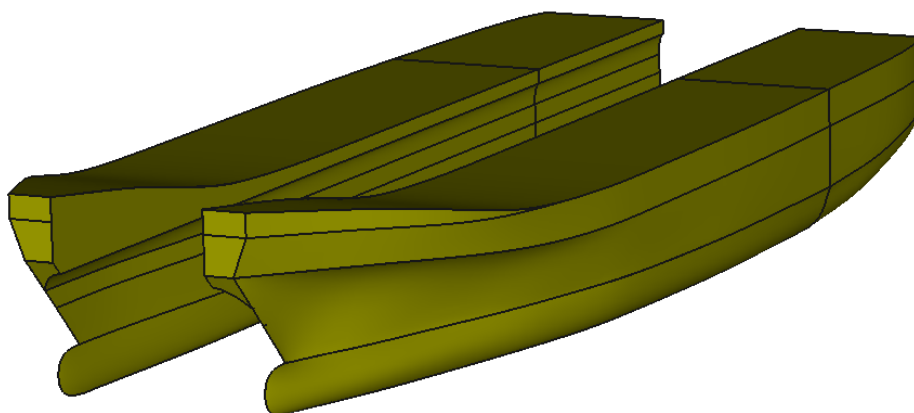


Gambar 7 *Body plan* model katamaran asimetrik
Sumber: (Muhammad, Andi Haris; Yasukawa, H., 2009)

2.4 Pemodelan dan Validasi Lambung Katamaran Asimetrik

Tahap selanjutnya ialah melakukan pemodelan ulang lambung katamaran asimetrik yang didasarkan pada data yang telah dikumpulkan berupa dimensi utama kapal dan bentuk *body plan*. Karena referensi untuk lambung katamaran asimetrik yang diperoleh hanya mencakup *body plan* dan dimensi utama tanpa disertai tabel offset, maka sebagai alternatif model didesain ulang dengan ukuran utama konstan atau tidak berubah. Pemodelan lambung dilakukan menggunakan perangkat lunak Maxsurf Modeler Advanced. Setelah model katamaran asimetrik selesai dibuat sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 8. Selanjutnya, dilakukan transformasi bentuk untuk menyesuaikan dengan ukuran lambung asli dari data yang telah dikumpulkan agar lambung yang dihasilkan lebih baik dan presisi. Selain itu, variasi jarak antar lambung (S/L) dilakukan pada nilai 11.6; 10.2; dan 13.0.

Proses validasi terhadap model lambung katamaran asimetrik dengan membandingkannya dengan referensi jurnal. Validasi mencakup parameter dimensi lambung seperti panjang kapal (L_{pp}), lebar (B), volume displacement (∇), serta koefisien bentuk lambung seperti koefisien blok (CB), dan koefisien hidrodinamik gaya X ($X'o$). Parameter diambil dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan model katamaran asimerik [14]. Adapun model utama kapal yang telah didesain menggunakan *maxsurf modeler advanced* sebagaimana Tabel 4 dan telah tervalidasi nilai $X'o$ yang didapatkan dari simulasi *ansys* berupa tahanan kapal yang nantinya diturunkan menggunakan persamaan 1 untuk mencari nilai koefisien hidrodinamik gaya X ($X'o$), dapat ditunjukkan pada Tabel 5.



Gambar 8 Bentuk 3D lambung kapal katamaran asimetrik *round bilge*

Tabel 4 Data ukuran utama model kapal katamaran asimerik *round bilge*

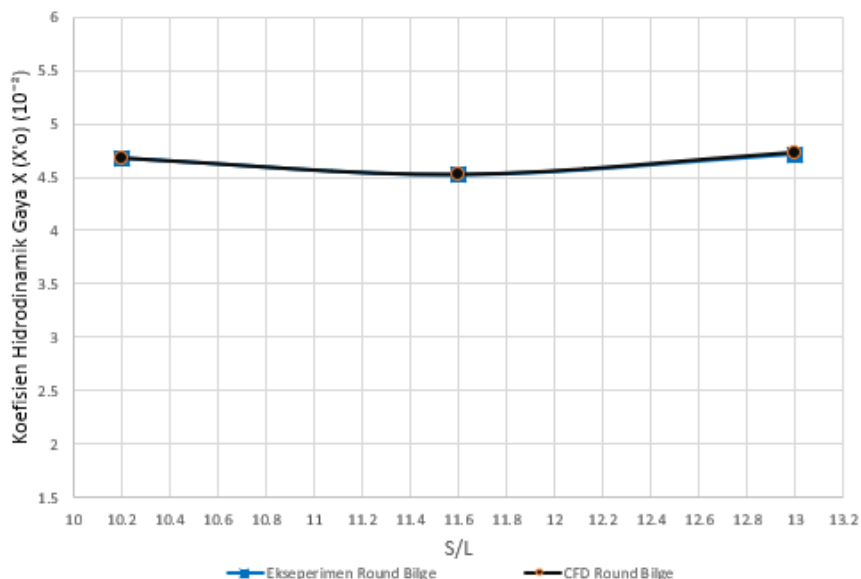
Ukuran Utama	Nilai		Unit	Difference (%)	Keterangan
	Katamaran Round	Referensi			
LPP	28	28	m	0.000	Memenuhi
LWL	28.8	28.8	m	0.000	Memenuhi
Volume	249.2	249.2	m ³	0.000	Memenuhi
B	4	4	m	0.000	Memenuhi
H	3.34	3.34	m	0.000	Memenuhi
T	1.7	1.7	m	0.000	Memenuhi
WSA	342.1	342.1	m ²	0.000	Memenuhi
CB	0.655	0.655	-	0.000	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4, seluruh nilai ukuran utama model katamaran *round bilge* identik dengan nilai referensi, yang ditunjukkan oleh nilai *difference* sebesar 0.000% pada semua parameter. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang digunakan telah memenuhi spesifikasi desain yang direncanakan tanpa adanya deviasi geometrik.

Tabel 5 Validasi nilai koefisien hidrodinamika gaya X antara eksperimen dan CFD

Model	Drag	Koefisien Hidrodinamik gaya x ($X'o$)		Difference (%)
		(Eksperimen)	(CFD)	
11.6	-61489.8	-0.04521	-0.04531	0.214
10.2	-64017.7	-0.04675	-0.04679	0.095
13.0	-63360.8	-0.04712	-0.04731	0.409
Rata-rata		-0.04636	-0.04647	0.239

Validasi *drag* yang kemudian diturunkan menjadi nilai *hydrodynamic derivative* menggunakan persamaan 1 pada kecepatan 14.5 knot, dimana rata-rata ketiga model ialah 0.04647, sedangkan pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Muhammad, Andi Haris [14] rata-rata nilai $X'o$ pada ketiga model ialah 0.04636. Secara keseluruhan, perbandingan antara data eksperimen dan CFD untuk ketiga model kapal menunjukkan deviasi yang sangat kecil. Hal ini menandakan bahwa simulasi CFD cukup akurat dalam memprediksi gaya hidrodinamik kapal, dengan deviasi rata-rata hanya sekitar 0.239%.



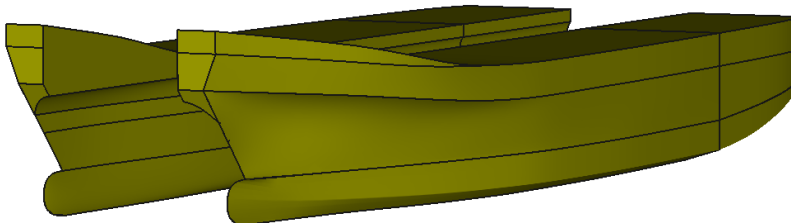
Gambar 9 Perbandingan koefisien hidrodinamik antara eksperimen dan CFD

Kedua kurva (eksperimen dan CFD) menunjukkan tren yang serupa. Terlihat bahwa seiring meningkatnya rasio S/L dari 10.2 hingga 13, koefisien gaya hidrodinamik mengalami fluktuasi yang tidak signifikan. Grafik ini digunakan untuk memvalidasi model CFD dengan membandingkan dengan data eksperimen, untuk menilai sejauh mana akurasi simulasi dalam memprediksi perilaku hidrodinamik kapal.

2.5 Pemodelan Lambung Katamaran Asimetrik Penampang *Hard Chine*

Setelah model awal telah selesai dibuat dan telah dinyatakan tervalidasi dengan data yang telah dikumpulkan, maka tahap selanjutnya ialah melakukan pemodelan lambung katamaran asimetrik *round bilge* ke bentuk lambung penampang *hard chine*. Pemodelan masih menggunakan software Maxsurf Modeler Advanced sebagai software design.

Desain dari *hard chine* diambil dari referensi literatur berupa bentuk *body plan* yang menyesuaikan parameter ukuran utama katamaran *round bilge* dan kemudian dimodelkan sesuai dengan bentuk dari lambung katamaran asimetrik *inside flat hard chine*, serta kontur yang berbeda hanya bagian *plat bilge*, yang lain tetap sama. Dikarenakan model awal didasarkan pada bentuk *body plan* yang didapatkan dari referensi yang mempunyai bentuk *round-bilge*, sehingga bentuk dari penampang lambung model awal akan melebur pada bentuk lambung dengan adanya suatu *chine* (patahan) dan menggunakan *bulbous* dapat dilihat pada Gambar 10. Cara membuat pelat *bilge* smooth (round) ke pelat *bilge* patahan (*chine*) ialah menentukan plat *bilge* dari *body plan* original terlebih dahulu, setelah itu, membuat *chine* dengan bending atau mematahkan secara langsung di *maxsurf*. Untuk membuat parameter nilai mendekati model *round* (model original) yaitu dengan menambah pelat sisi dan mengurangi pelat alas agar *chine* yang diinginkan sesuai dengan ukuran model referensi. Adapun parameter dari ukuran utama lambung katamaran asimetrik *hard chine* memiliki nilai konstan dengan model utama dapat ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 10 Bentuk 3D lambung kapal katamaran asimetrik *hard chine*
Tabel 6 Parameter ukuran utama model kapal katamaran asimerik *hard chine*

Ukuran Utama	Nilai		Unit	Difference (%)
	Model Round bilge	Model Hard Chine		
LPP	28	28	m	0.000
LWL	28.8	28.8	m	0.000
Volume	249.2	249.2	m ³	0.000
B	4	4	m	0.000
H	3.34	3.34	m	0.000
T	1.7	1.7	m	0.000
WSA	342.1	342.1	m ²	0.000
CB	0.655	0.655	-	0.000

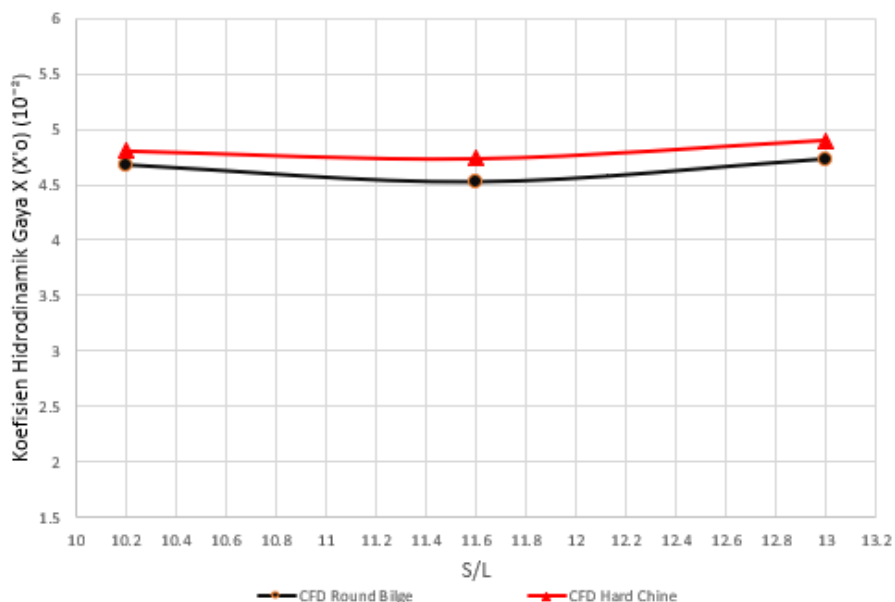
Berdasarkan Tabel 6, seluruh parameter kedua model menunjukkan nilai yang identik, dengan selisih (difference) sebesar 0.000% pada setiap variabel. perbedaan antara model *round bilge* dan *hard chine* hanya terletak pada bentuk penampang lambung, bukan pada ukuran utama atau parameter hidrostatisnya

Setelah validasi model utama telah valid, dilakukan perbandingan model antara model utama (round) dan model *hard chine* berdasarkan kecepatan yang sama, dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Validasi nilai koefisien hidrodinamika gaya X ($X'o$) antara *round bilge* dan *hard chine*

Model	Koefisien Hidrodinamik gaya x ($X'o$)		Difference (%)
	Round Bilge	Hard Chine	
11.6	-0.04531	-0.04736	4.32
10.2	-0.04679	-0.04804	2.59
13.0	-0.04731	-0.04899	3.42
Rata-Rata	-0.04647	-0.04813	3.45

koefisien hidrodinamik gaya X ($X'o$) pada model CFD *round bilge* menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan model CFD *hard chine* untuk setiap model yang diuji. Perbedaan persentase antara kedua model tersebut berkisar antara 2.60% hingga 1.87%, dengan rata-rata perbedaan sebesar 2.52%. Hal ini menunjukkan bahwa pada umumnya model CFD *hard chine* menghasilkan nilai koefisien yang lebih kecil dibandingkan dengan model CFD *round bilge*.



Gambar 11 Perbandingan koefisien hidrodinamik antara *round* dan *hard chine*

Kedua kurva model round pada Gambar 11 menunjukkan tren yang serupa, meskipun ada beberapa perbedaan. Terlihat bahwa seiring meningkatnya rasio S/L dari 10.2 hingga 13, nilai koefisien gaya hidrodinamik mengalami fluktuasi yang tidak signifikan. Sedangkan *hard chine* menunjukkan tren yang sama dengan nilai yang lebih besar.

2.6 Pengujian Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (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:

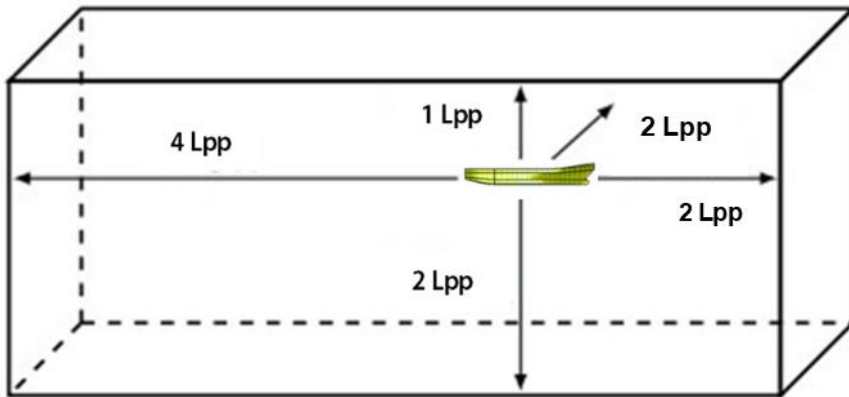
a. Tahap *Geometry*

Tahap ini merupakan tahapan awal yang dilakukan pada proses simulasi di ANSYS CFX, dengan memasukan model yang telah dibuat dalam bentuk file *stp* (.stp) dan membuat domain untuk fluida serta memberikan nama identitas domain. [40] pada Gambar 12 merupakan dimensi domain yang minimum yang di rekomendasikan dan disetujui oleh ITTC.

Fluid domain entities	B.C	ITTC
Rectangular	Inlet	1–2 L_{PP}
	Outlet	3–5 L_{PP}
	Top & Bottom wall	1–2 L_{PP}
	Side wall	1–2 L_{PP}

Gambar 12 Ukuran *geometry* domain fluida

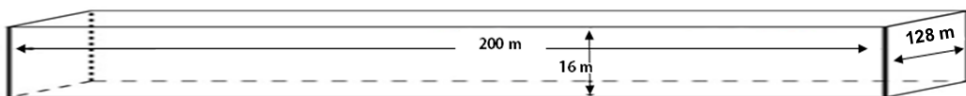
Sumber: (Ahmed, G. Elkafas; Mohamed, M. Elgohary; Akram, E. Zeid., (2019)



Gambar 13 Variabel nilai domain fluida yang digunakan

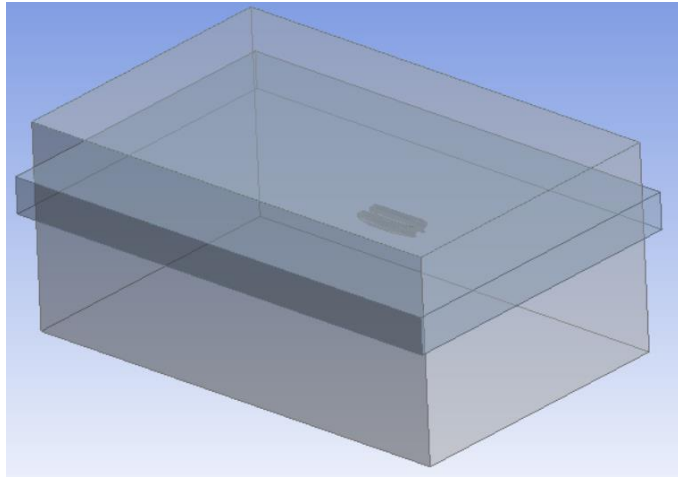
Proses pembuatan *geometry* dan domain fluida menggunakan design modeler di ANSYS. Langkah pertama *import* file model dengan klik kanan pada menu *file > import external geometry file >* pilih file model dengan format stp yang telah dibuat sebelumnya *>* pilih *generate* untuk memunculkan model kapal.

Membuat domain fluida dengan memilih *enclosure* pada *menu tools >* klik *enclosure >* sesuaikan dimensi domain fluida yang digunakan. Berdasarkan [40] jarak dinding depan dengan haluan kapal 2 Lpp, jarak dinding samping terhadap samping kapal 2 Lpp, jarak dinding atas dengan bagian atas kapal 1 Lpp, jarak dinding belakang dengan bagian buritan kapal 4 Lpp, dan untuk jarak dinding yang berada di bawah kapal 2 Lpp dan pilih *generate* untuk memunculkan *enclosure*. Menghilangkan volume model kapal yang ada dalam domain fluida dengan pilih menu *create >* pilih *boolean >* detail target *bodies* pilih domain fluida *>* detail *tool bodies* pilih model kapal *>* *generate*.



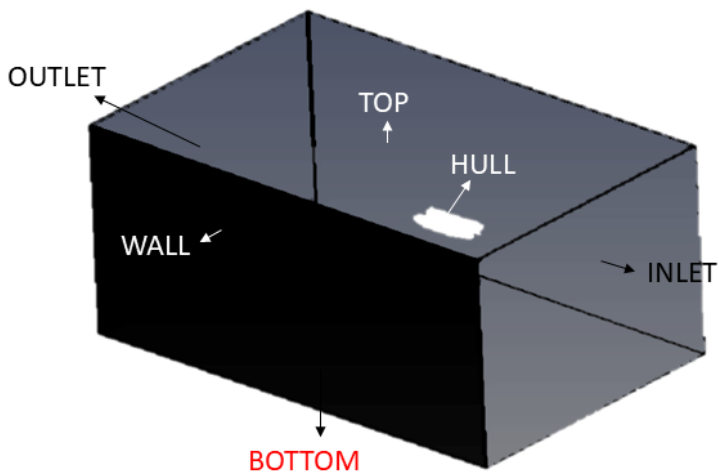
Gambar 14 Nilai domain *body of influence* yang digunakan

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



Gambar 15 Domain fluida simulasi CFD

Pada pembuatan domain fluida pada simulasi tahanan terdiri dari nama *inlet*, *outlet*, *side*, *top*, *bottom*, *wall* 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 detail *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 dan kondisi batas simulasi dapat dilihat pada Gambar 16.



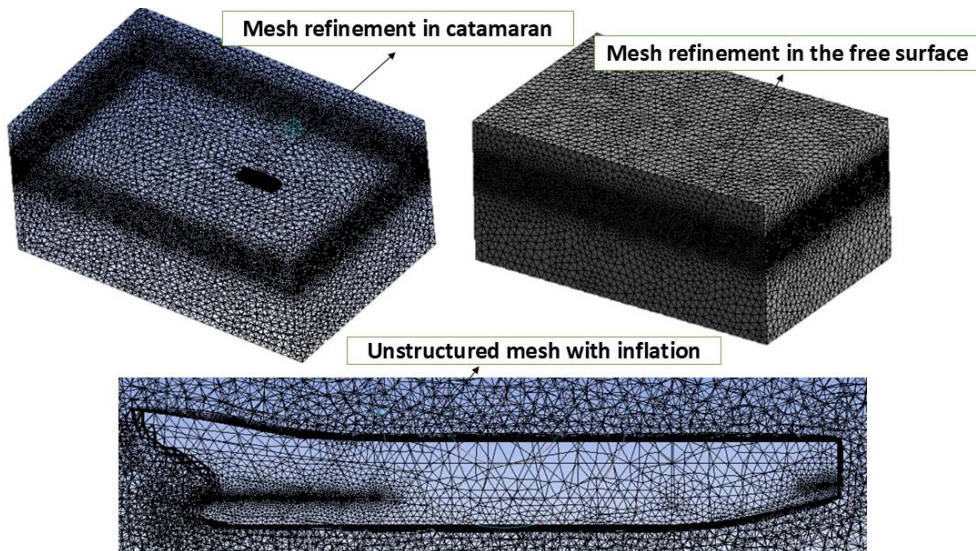
Gambar 16 Nama domain simulasi fluida

b. 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 tahapan *solution*. Tahapan ini

akan mempengaruhi akurasi dari perhitungan, kecepatan simulasi, dan konvergensi. Langkah-langkah pada tahapan *mesh*, caranya dengan pilih menu *mesh > insert > sizing > face hull > elemen size* ukuran 0.25 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 dbuat *> elemen size* untuk ukuran *mesh* 3 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 smooth transition* untuk *definition inflation option > masukan ukuran inflation* pada *first layer height > dipilih 11 lapisan* untuk *maximum layers > klik generate* untuk memulai proses *meshing*. Bentuk dari *mesh* pada domain fluida dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17 *Unstructured 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. [41] *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 [42].

Mesh Statistics		Mesh Statistics	
Selected Region: Assembly		Selected Region: Assembly	
Number of Nodes:	316502	Number of Nodes:	318850
Number of Elements:	1138107	Number of Elements:	11407011
Tetrahedra:	788381	Tetrahedra:	785621
Pyramids:	1486	Pyramids:	1405
Wedges:	348240	Wedges:	353675

Gambar 18 Jenis *elements* yang digunakan

Mesh didominasi oleh elemen *tetrahedral*, yang cocok untuk geometri lambung kapal yang kompleks, serta *wedge* yang cukup banyak yang mengindikasikan adanya pemodelan lapisan batas (*boundary layer refinement*) di sekitar permukaan kapal. Dengan jumlah elemen lebih dari satu juta, *mesh* ini termasuk kategori cukup halus dan layak untuk analisis hidrodinamika seperti perhitungan tahanan dan distribusi tekanan.

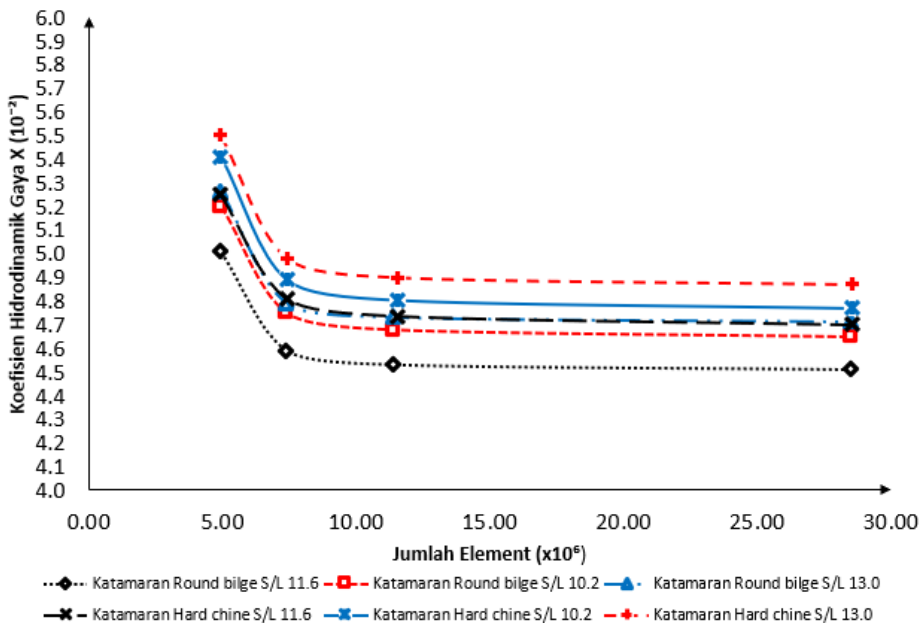
a) **Grid generation**

Dalam penelitian ini, pembuatan *mesh* dilakukan menggunakan *mesh ansys*. Untuk mendiskretisasi domain komputasi, digunakan kombinasi antara *mesh* terstruktur dan tak terstruktur. Dengan mempertimbangkan kerumitan bentuk geometris lambung kapal, dibuat *mesh* dengan elemen segitiga (*tetrahedral*) pada permukaan lambung kapal, kemudian lapisan batas (*inflation layer*) disempurnakan menggunakan elemen prisma dengan memperluas *node* pada *mesh* permukaan. Di sekitar kapal, digunakan elemen *tetrahedral* yang diperluas untuk mengisi ruang di sekitarnya, sedangkan pada daerah jauh (*far field*) dibuat *mesh* tak terstruktur dengan teknik pemodelan tertentu untuk mengurangi jumlah total elemen.

Dalam penelitian ini, pembuatan *mesh* dilakukan dengan sangat hati-hati karena pemilihan ukuran *mesh* yang tepat sangat penting dalam proses komputasi. Dengan jumlah elemen yang besar, *mesh* halus (*fine mesh*) dapat menghasilkan hasil yang akurat dalam ANSYS CFX, namun juga meningkatkan biaya dan waktu komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, dilakukan studi konvergensi *mesh* (*mesh convergence study*) pada kecepatan 14.5 knot untuk bentuk lambung *round* dan *hard chine*, dengan tujuan menentukan ukuran *mesh* yang memiliki ketelitian numerik yang memadai sekaligus jumlah elemen yang efisien. Tabel 8 dan Gambar 19 diadaptasi dari analisis *independensi grid* [43].

Tabel 8 *Grid independence study* katamaran *round bilge* (A) dan *hard chine* (B)

Element	Koefisien Hidrodinamika ($X'o$)			Difference (%)		
	S/L = 11.6	S/L = 10.2	S/L = 13.0	S/L = 11.6	S/L = 10.2	S/L = 13.0
(A)						
493.047	0.05010	0.05200	0.05264			
739.571	0.04590	0.04750	0.04790	9.2%	9.5%	9.9%
1.138.107	0.04531	0.04679	0.04731	1.3%	1.5%	1.2%
2.851.849	0.04510	0.04650	0.04712	0.5%	0.6%	0.4%
(B)						
493.981	0.05250	0.05410	0.05500			
740.971	0.04810	0.04890	0.04980	9.1%	10.6%	10.4%
1.156.355	0.04736	0.04804	0.04899	1.6%	1.8%	1.6%
2.853.249	0.04700	0.04770	0.04870	0.8%	0.7%	0.6%

Gambar 19 *Grid independence study*

Jumlah elemen pada *mesh* yang baru sebaiknya meningkat setidaknya sekitar 1.5 kali dibandingkan *mesh* sebelumnya agar perubahan jumlah elemen yang diperoleh benar-benar signifikan [44]. Grid independence dilakukan untuk menghasilkan hasil simulasi yang paling optimal dimana selisih persentase hasil dari simulasi CFD tersebut terhadap jumlah total elemen kurang dari 5% sehingga waktu iterasi yang dihasilkan dapat relatif minimum. Selain dari jumlah total elemen, waktu iterasi juga dipengaruhi oleh spesifikasi komputer yang digunakan. Grid independence dilakukan pada model katamaran *round* dan *hard chine* dengan variasi S/L 11.6; 10.2; dan 13.0 pada kecepatan pengujian 14.5 knot dengan ukuran *meshing* yang berbeda-beda yang berakibat dengan jumlah elemen yang digunakan.

Gambar 19 menggambarkan nilai dari independensi grid. Independensi grid tercapai ketika perbedaan resistansi antara sejumlah *elemen* yang ditentukan dan elemen sebelumnya kurang dari 2% [45]. Resistansi kumulatif dari model dihitung dalam studi ini, dengan menggunakan berbagai jumlah elemen *mesh* atau *grid*, yang berkisar antara 493.047 hingga 2.851.849 untuk katamaran *round*, sedangkan untuk *hard chine* berkisar 493.981 hingga 2.853.249. Jumlah *grid* ideal, seperti yang digambarkan dalam Tabel 8 adalah 1.138.107 untuk katamaran tipe *round* dan 1.156.355 untuk katamaran tipe *hard chine* yang dimana memenuhi persyaratan untuk *grid independence*.

b) V&V study of total resistance

Studi konvergensi parameter dilakukan dengan mengikuti proses penyempurnaan sistematis (systematic refinement process) untuk menghasilkan beberapa solusi. Ketidakpastian numerik (numerical uncertainty) dari model CFD menggunakan data yang disajikan pada Tabel 8. Dalam penelitian ini, metode ekstrapolasi Richardson (Richardson's extrapolation method) untuk konvergensi *grid* dipilih sebagai pendekatan yang sesuai untuk memperkirakan kesalahan *mesh* (mesh error) [46]. Studi konvergensi *grid* dilakukan berdasarkan rekomendasi analisis ketidakpastian ITTC (International Towing Tank Conference) [47]. Rasio konvergensi RG dapat dituliskan sebagai:

$$R_G = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (12)$$

di mana ε_{21} merupakan selisih hasil estimasi antara *mesh* sedang (medium) dan *mesh* halus (fine), sedangkan ε_{32} merupakan selisih hasil estimasi antara *mesh* halus (fine) dan *mesh* kasar (coarse).

Kondisi konvergensi dari sistem ini harus dijelaskan terlebih dahulu untuk dapat menilai nilai ekstrapolasi dari persamaan di atas. Kondisi konvergensi tersebut adalah sebagai berikut:

- i Monotonic convergence: $0 < Ri < 1$
- ii Oscillatory convergence: $-1 < Ri < 0$
- iii Monotonic divergence: $Ri > 1$
- iv Oscillatory divergence: $Ri < -1$

Untuk konvergensi monotonik (monotonic convergence), digunakan ekstrapolasi Richardson umum (generalized Richardson extrapolation) untuk memperkirakan kesalahan (error) dan ketidakpastian (uncertainty). Pada konvergensi *osilatori* (oscillatory convergence), hasil menunjukkan adanya osilasi atau fluktuasi dalam nilai yang diperoleh. Sedangkan pada divergensi (divergence), hasil justru menyimpang atau menjauh dari nilai sebenarnya, sehingga kesalahan dan ketidakpastian tidak dapat ditentukan.

Indeks konvergensi *grid* (Grid Convergence Index/GCI) merupakan metode standar yang digunakan untuk melaporkan tingkat kualitas konvergensi *grid*. Perhitungannya dilakukan pada setiap tahap penyempurnaan (*refinement step*). Dalam penelitian ini, GCI dihitung untuk dua tahap, yaitu dari *grid* 3 ke *grid* 2, dan dari *grid* 2 ke *grid* 1, di mana e adalah selisih kesalahan (*error*) antara dua *grid* tersebut, dan F_s merupakan faktor keamanan (*safety factor*) dengan nilai $F_s = 1.25$. Faktor keselamatan yang digunakan adalah 1.25. Nilai seragam $r_i = \sqrt{2}$ disarankan, yang menunjukkan bahwa *grid* diperhalus atau diperkasakan dengan faktor $r_i = \sqrt{2}$ antara tingkat-tingkat *grid* yang berbeda.

Penelitian mengenai konvergensi dilakukan dengan menggunakan tiga tingkat resolusi *mesh* yang masing-masing diberi label “coarse” (kasar), “medium” (sedang), dan “fine” (halus). Perubahan pada *mesh* dilakukan dengan mengubah ukuran elemen pada permukaan (*face size*), sementara ukuran elemen pada badan (*body size*) dipertahankan tetap. Hal ini dilakukan untuk memperoleh efek yang diinginkan terhadap hasil simulasi. Karena resolusi *mesh* ditentukan berdasarkan perhitungan dinding standar (*wall calculation*), maka lapisan inflasi (*inflation layer*) tetap konstan selama seluruh proses penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Tiga detail resolusi *mesh* yang bervariasi

Model type	Detail	Fine (1)	Medium (2)	Coarse (3)
Catamaran Round bilge	Body sizing (m)	1.5	3	4.5
	Face sizing (m)	0.2	0.25	0.3
	Number of elements (NE)	2.851.849	1.138.107	739.571
	Coeff. Hidrodinamika ($X'o$)	4.51×10^{-2}	4.53×10^{-2}	4.59×10^{-2}
Catamaran Hard Chine	Body sizing (m)	1.5	3	4.5
	Face sizing (m)	0.2	0.25	0.3
	Number of elements (NE)	2.853.249	1.156.355	740.971
	Coeff. Hidrodinamika ($X'o$)	4.70×10^{-2}	4.73×10^{-2}	4.81×10^{-2}

Tabel 9 menunjukkan hasil uji sensitivitas *mesh* pada dua tipe katamaran, yaitu *round bilge* dan *hard chine*, dengan tiga tingkat resolusi *mesh*: Fine, Medium, dan Coarse. Variasi dilakukan pada ukuran elemen *body sizing* dan *face sizing*, yang memengaruhi jumlah total elemen serta nilai koefisien hidrodinamika.

Secara umum, *mesh* Medium (2) dapat dianggap sebagai pilihan yang optimal karena memberikan hasil yang mendekati *mesh* Fine namun dengan jumlah elemen dan biaya komputasi yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa model telah melalui proses uji independensi *grid* dengan baik dan hasil simulasi dapat dianggap valid.

Berdasarkan rumus-rumus pada bagian persamaan yang digunakan, hasil-hasil telah dihitung dan disajikan Tabel 10.

Tabel 10 Analisis ketidakpastian simulasi CFD

Outcome	Equation	Catamaran 11.6 (RB)	Catamaran 11.6 (HC)
Difference of estimation	$\varepsilon_{21} = C_{T2} - C_{T1}$	0.00021	0.00036
	$\varepsilon_{32} = C_{T3} - C_{T2}$	0.00059	0.00074
Refinement ratio	$r_{21} = \left(\frac{NE_2}{NE_1}\right)^{1/3}$	0.13303	0.13509
	$r_{32} = \left(\frac{NE_3}{NE_2}\right)^{1/3}$	0.21661	0.21359
Convergence	$R_i = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{32}$	0.34884	0.49327
Order of accuracy	$P = \ln\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)/\ln(r_i)$	3.03871	2.03909
Extrapolated relative error	$e_{21} = \frac{\varepsilon_{21}}{ri^p} - 1$	0.000113	0.000350
	$e_{21} = \frac{\varepsilon_{32}}{ri^p} - 1$	0.000316	0.000720
Grid convergence index (GCI)	$GCI_{21} = F_S e_{21} $	0.000130	0.000554
	$GCI_{32} = F_S e_{32} $	0.000366	0.001140

Tabel 10 menyajikan hasil dari indeks konvergensi (GCI) untuk pengaturan *mesh*. *Mesh* halus menunjukkan nilai GCI sebesar 0.000130 untuk katamaran *round bilge* dan 0.000554 untuk *hard chine*, sementara *mesh* kasar menunjukkan nilai GCI sebesar 0.000366 untuk *round* dan *hard chine* 0.001140. Nilai minimum untuk indeks konvergensi biasanya ditentukan oleh persyaratan spesifik dari simulasi dinamika fluida komputasi (CFD) yang dilakukan. Seringkali disarankan bahwa indeks konvergensi (GCI) idealnya digunakan. Meskipun demikian, *mesh* halus dipilih untuk simulasi ini karena menawarkan presisi yang lebih besar dalam simulasi, sehingga mengurangi kesalahan yang diperkenalkan selama penyelidikan.

c. 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 terdiri dari *analysis type*, *rigid body*, domain fluida, identitas *boundary* fluida, dan *initialization*.

Pengaturan *setup flow analysis* dapat dilihat pada Tabel 10, 11, 12, 13. Pada simulasi CFD gerak kapal dibatasi dengan membebaskan gerakan *pitch*, sementara

gerakan kapal yang lain tidak digunakan. Asumsi ini digunakan untuk memprediksi trim dan gerakan naik turun kapal.

Tabel 11 *Analysis type*

Parameter	Keterangan
Basic option	Transient
Time duration	1500
Time steps	Time step 0.01 (s)
Initial time	Time 0 (s)

Tabel 12 *Rigid body*

Parameter	Keterangan
Mass	255.430 (kg)
Location	Hull
Mass of moment inertia XX componen	Sesuai Solidwork (kgm ²)
Mass of moment inertia YY componen	Sesuai Solidwork (kgm ²)
Mass of moment inertia ZZ componen	Sesuai Solidwork (kgm ²)
Traslational degrees of freedom	None
Rotational degrees of freedom	Y axis
Gravity	Cartesian components
Gravity X dirn	0 (ms ⁻²)
Gravity Y dirn	0 (ms ⁻²)
Gravity Z dirn	-9.81 (ms ⁻²)

Tabel 13 Domain fluida

Parameter	Keterangan
Fluid and particle definition	Air dan udara
Morphology	Continuous fluid
Refrence pressure	1 (atm)
Buoyancy model	Buoyant
Ref. location	Automatic
Domain motion	Stationary
Mesh deformation	Regions of motion specified
Displacement rel. to	Previous mesh

Multiphase	Homogeneous model
Free surface model	None
Turbulence	Shear Stress Transport
Interphase transfer	Mixture model

Tabel 14 Identitas *boundary* fluida

Nama boundary	Boundary type	Boundary condition
Inlet	Inlet	Cartesian velocity components
Outlet	Outlet	Static pressure
Wall	Wall	Free slip wall
Top	Wall	Free slip wall
Bottom	Wall	Free slip wall
Ship	Wall	Rigid body solution, no slip wall

Tabel 15 *Initialization*

Parameter	Keterangan
Velocity type	Cartesian
Cartesian velocity components U	10; 11.5 13; 14.5; 16; 17.5 dan 19 (knot)
Cartesian velocity components V	0 (ms ⁻¹)
Cartesian velocity components W	0 (ms ⁻¹)
Turbulence	Intensity and length scale
Fractional intensity	Automatic
Eddy length scale	Automatic
Fluid volume fraction udara	CEL AirVOF
Fluid volume fraction air	CEL WaterVOF

Pada penelitian ini untuk CFX Expressions Language (CEL) yang digunakan pada Tabel 15 berdasarkan penelitian [48] 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 = $\text{step}((z-\text{Draft})/1[\text{m}])$, untuk fluida air CEL WaterVOF = $1-\text{step}((z-\text{Draft})/1[\text{m}])$. Untuk mengatur setup solver terdiri dari *solver control* dan *output control*, untuk pengaturan *setup solver* dapat dilihat pada Tabel 16 dan untuk *output control* dilihat pada Tabel 17.

Tabel 16 *Solver control*

Parameter	Keterangan
Advection scheme	High resolution
Transient scheme	Second order backward euler
Time step initialization	Automatic
Turbulence numerics	First order
Residual type	RMS
Residual target	0.0001
Advanced options	Multiphase control
Initial volume fraction smoothing	Volume-weighted

Tabel 17 *Output control*

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

Untuk mengatur *setup* material pada simulasi yang menggunakan dua 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 18.

Tabel 18 *Solver control*

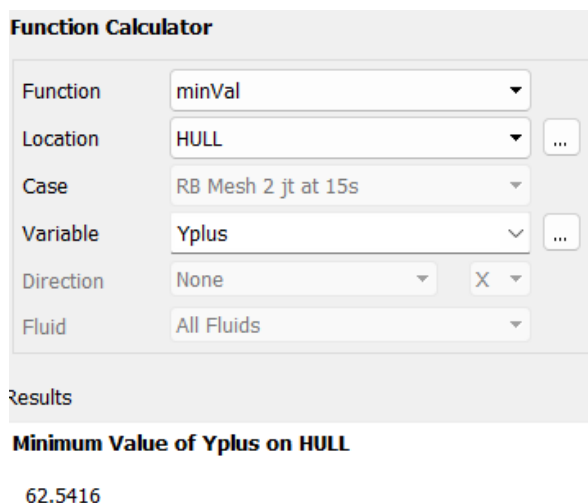
Parameter	Keterangan
Water molar mass	18.02 (kgkmol ⁻¹)
Water density	1025 (kgm ⁻³)
Air molar mass	28.96 (kgkmol ⁻¹)
Air density	1.185 (kgm ⁻³)

d. 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.

e. 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 pada lapisan batas [49]. Nilai *wall y+* diambil sesuai kisaran teori yang telah didapatkan di lihat pada Gambar 20.



Gambar 20 *Wall y+*

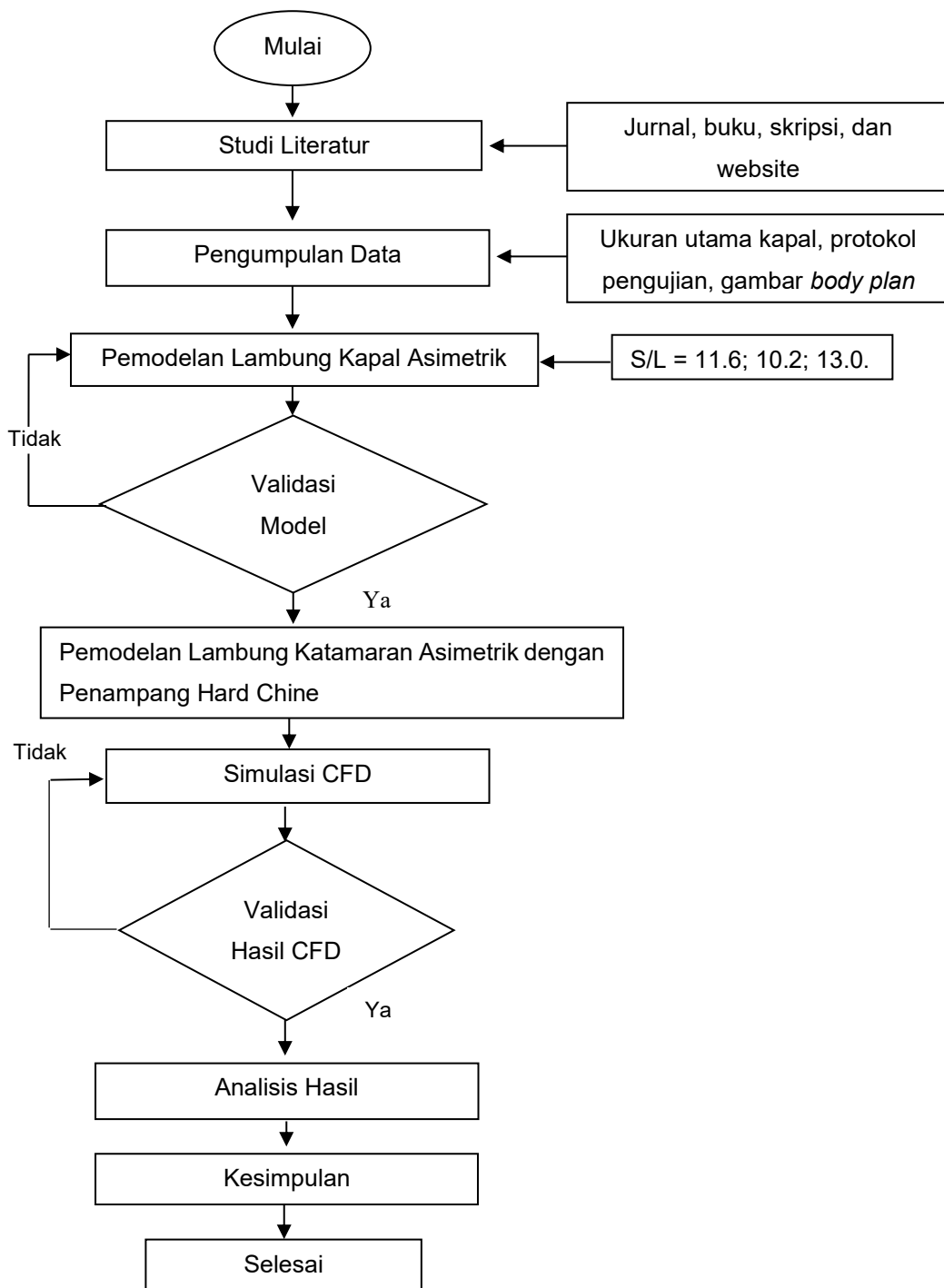
2.7 Hasil dan Pembahasan

Setelah proses simulasi selesai, langkah selanjutnya adalah menganalisa dan membahas hasil simulasi. Analisis hasil dilakukan untuk meperkirakan *output* dari simulasi yang dilakukan. Adapun *output* dari hasil simulasi untuk memperlihatkan besarnya nilai *drag*, serta koefisien hidrodinamik gaya *X* kapal pada setiap variasi bentuk lambung dan jarak antar lambung (S/L) dengan kondisi kecepatan yang berbeda.

2.8 Kesimpulan

Setelah analisis dilakukan, maka dari hasil analisis tersebut dibuat kesimpulan untuk merangkum keseluruhan hasil penelitian.

2.9 Kerangka Pikir



Gambar 21 Kerangka alur penelitian