

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri perkapalan global saat ini dihadapkan pada tantangan besar untuk menciptakan kapal yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Salah satu solusi inovatif yang banyak dikembangkan adalah kapal multihull, khususnya trimaran, yang menawarkan keunggulan signifikan dalam hal stabilitas dan efisiensi hidrodinamika dibandingkan kapal monohull konvensional (Yun & Bliault, 2012). Kapal trimaran dengan konfigurasi satu lambung utama (main hull) dan dua lambung pendukung (*outrigger*) telah terbukti mampu mengurangi tahanan gelombang (*wave resistance*) secara signifikan, terutama pada kecepatan tinggi (Sukas dkk, 2017).

Namun, desain trimaran konvensional masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama terkait interaksi gelombang antara lambung utama dan outrigger yang dapat meningkatkan tahanan total kapal. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan *outrigger* asimetris dengan konfigurasi *flat side inside* (sisi datar menghadap ke dalam) dapat mengurangi interferensi gelombang yang tidak diinginkan (Utama & Jamaluddin, 2019). Konfigurasi ini diduga mampu menciptakan pola aliran fluida yang lebih teratur di area antara lambung utama dan outrigger.

Inovasi lain yang patut diperhatikan adalah penerapan inverted bow pada lambung utama. Desain bow terbalik ini telah sukses diaplikasikan pada kapal perang dan kapal cepat monohull, dimana mampu mengurangi tahanan gelombang secara signifikan pada kecepatan tinggi dengan memotong gelombang lebih efisien (Mynard dkk, 2015). Namun, penerapannya pada kapal trimaran masih jarang diteliti, terutama dalam kombinasi dengan outrigger asimetris.

Faktor kritis lain yang mempengaruhi performa hidrodinamika trimaran adalah jarak antar lambung (*hull spacing*). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi jarak ini mempengaruhi secara signifikan pola interferensi gelombang dan distribusi tekanan hidrodinamik (ITTC, 2021). Jarak yang terlalu sempit dapat meningkatkan *wave interference*, sementara jarak terlalu lebar justru dapat meningkatkan *frictional resistance* akibat luas permukaan basah yang lebih besar. Penentuan jarak lambung yang optimal penting untuk meminimalkan tahanan dan meningkatkan efisiensi kapal (Setiawan & Purwanto, 2021). Selain jarak antar lambung, bentuk lambung kapal juga merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi besarnya tahanan total kapal.

Tahanan kapal merupakan gaya yang timbul akibat interaksi antara lambung kapal dan air ketika kapal bergerak. Besarnya tahanan sangat dipengaruhi oleh bentuk lambung, khususnya bagian haluan, karena pola aliran air dan pembentukan gelombang di sekitar kapal bergantung pada desain tersebut. Tahanan yang besar mengharuskan kapal menggunakan mesin dengan daya lebih tinggi, sehingga

meningkatkan konsumsi bahan bakar. Oleh karena itu, desain lambung yang optimal sangat penting untuk meningkatkan efisiensi operasi kapal, seperti ditunjukkan oleh penelitian yang membahas pengaruh bentuk haluan terhadap penurunan tahanan dan perbaikan pola aliran. (Sahlan dkk., 2016).

Dengan kemajuan teknologi, analisis hidrodinamika kapal kini dapat dilakukan secara komputasi menggunakan perangkat lunak berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD), salah satunya adalah *Autodesk CFD*. Teknologi ini memungkinkan perancang untuk mensimulasikan berbagai variasi desain tanpa perlu membuat model fisik, sehingga mempercepat dan menghemat proses desain. Penggunaan CFD terbukti efektif dalam mengevaluasi performa lambung kapal secara menyeluruh dalam berbagai kondisi operasional. (Autodesk, 2024).

Berdasarkan latar belakang ini, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian berjudul “Studi Tahanan Kapal Trimaran Dengan *Outrigger* Asimetris *Flat Side Inside* dan *Inverted Bow* Dengan Variasi Jarak Lambung Menggunakan Aplikasi *Autodesk CFD*.”

1.2 Teori

1.2.1 Kapal Trimaran

Kapal Trimaran merupakan kapal *multihull* yang mempunyai tiga lambung, dimana lambung pada posisi tengah sebagai lambung utama dan dua lambung di sisinya yaitu *sidehull* atau yang sering disebut *outrigger*, dengan tambahan lambung di sisinya kapal trimaran tentu memiliki nilai stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan kapal dengan lambung tunggal. Kapal Trimaran dengan desain 3 lambung adalah pengembangan dari bentuk lambung tunggal yang bertujuan untuk meningkatkan kecepatan kapal yang disertai berkurangnya daya yang dibutuhkan dalam pengoprasiannya. Secara umum Kapal Trimaran juga sama dengan kapal yang lain. Hanya saja kapal trimaran memiliki nilai efisiensi dan lebih efektif dibandingkan dengan kapal yang ada. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan mengapa kapal ini lebih efisien dan efektif melihat kelebihan yang dimiliki (A. Gibson, dan I.K.A.P Utama, 2016).

Adapun beberapa kelebihan yang dimiliki Kapal Trimaran yaitu Geladak yang ada pada kapal trimaran lebih lebar dan luas sehingga mempermudah dalam penempatan muatan yang membutuhkan space lebih besar. Desain bentuk lambung trimaran cukup berperan penting dalam mengurangi hambatan pada, tentu konsumsi bahan bakar akibat daya mesin jadi lebih efisien. Hal ini bermanfaat bagi kapal patroli yang dirancang tidak untuk nilai ekonomis.

Peningkatan kecepatan dari daya mesin yang rendah akan tercapai disertai konsumsi bahan bakar lebih ekonomis. Kenyamanan dan kestabilan yang dihasilkan dari desain kapal trimaran lebih baik sehingga apabila digunakan sebagai alat transportasi pun sesuai atau bahkan jauh lebih baik.



Gambar 1. Kapal Trimaran

Sumber: Pi Yachts and McPherson Yacht Design unveil Dragonship 80

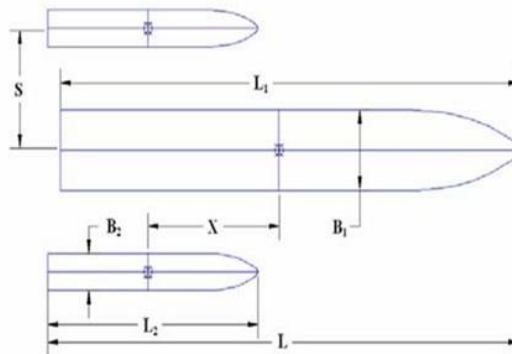
a. Kelebihan

- Meskipun ada kemungkinan kapal trimaran terbalik, hal ini frekuensinya kecil bila dibandingkan dengan kapal *monohull*. Karena mendapatkan sebuah gaya perlawanan yang besar apabila terjadi gerak rolling yang diberikan Ama atau katir (*outrigger*).
- Desain kapal trimaran dianggap hampir tidak dapat tenggelam karena walaupun kapal diisi penuh dengan air. Gaya apung pada salah satu Ama atau katir sudah cukup untuk menahan seluruh gaya apung kapal.
- Kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan kapal *monohull* juga menjadi penting bagi keselamatan saat kondisi cuaca yang buruk atau menjadi lebih buruk karena kapal dapat meninggalkan daerah berbahaya lebih cepat.

b. Kekurangan

- Apabila kapal trimaran terbalik maka akan menjadi lebih sulit untuk mengembalikan legak kembali atau keposisi semula dari pada kapal *monohull*. Terbalikny trimaran biasanya menyebabkan kerusakan berat pada tiang dan tali-temali.

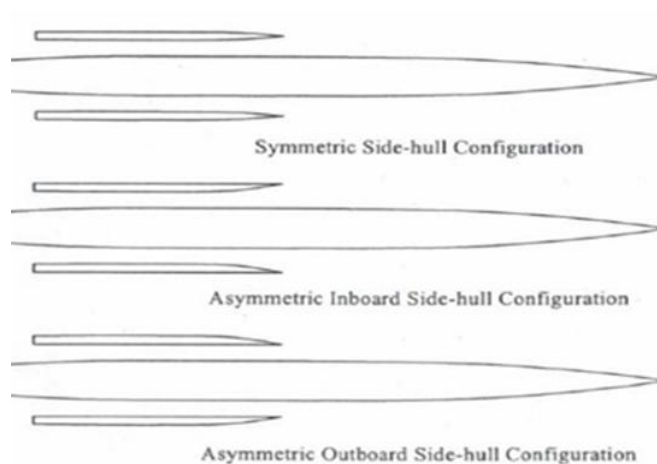
- Pada waktu kapal trimaran di pelabuhan dimungkinkan kapal mengikuti angin karena kapal yang ringan dan sarat yang dangkal sementara untuk kapal monohull biasanya mengikuti arus. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya tubrukan dengan kapal lain yang ada di dekatnya dan bisa terjadi tumpang tindih.
- Kesulitan jalur perairan yang sempit.



Gambar 2. Konfigurasi untuk kapal trimaran
Sumber : Gibson, (2016)

Desain lambung kapal trimaran pada berbagai kapal tidak sama. Trimaran memiliki berbagai macam bentuk. Namun secara umum ada tiga bentuk atau model dari lambung trimaran yaitu sebagai berikut:

- Simetris
- Asimetris *in-board*
- Asimetris *out-board*



Gambar 3. Jenis lambung trimaran

Sumber : Samuel, Universitas Diponegoro, Semarang 2013

Pemilihan bentuk badan kapal harus didasarkan pada metode yang tepat sehingga

hasilnya akan dapat diandalkan. Trimaran dengan geladak yang lebih besar adalah salah satu contoh konsep rancangan yang berhasil dalam mengatasi gerakan oleng yang merupakan kelemahan generic kapal konvensional.

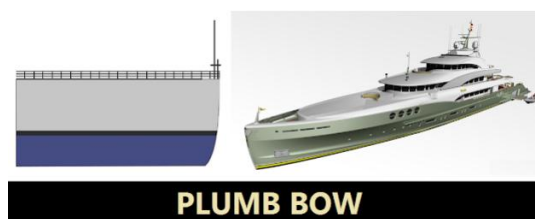
Dalam penelitian ini saya menggunakan Jenis Lambung Kapal Trimaran Flat Side Inside. Kapal dengan bentuk lambung *flat side inside* dimana sisi lambung bagian dalam memiliki bidang yang datar atau asimetris di dalam. Kapal trimaran dengan *outrigger* asimetris *flat side inside* dikembangkan dengan menggeser volume displasemen centerline demihull guna mengurangi efek dari interferensi yang menjadi hambatan yang merugikan antara *outrigger*. Pada kapal trimaran bagian dalam *outrigger* berupa bidang datar. Pada desain datar dari lambung bagian dalam yang ada di kedua sisi lambung utama dapat membuat tekanan dan kecepatan aliran disekitar kapal berbeda untuk setiap lambung. Pengaruh besar kecil distribusi tekanan dan aliran sekitar kapal yang disebabkan oleh badan kapal maupun gelombang yang bergesekan pada kapal trimaran asimetris

Dengan detail lambung ini, aliran fluida dari haluan kapal terkonsentrasi lurus mengikuti bentuk sisi dalam kapal diantara lambung utama kapal trimaran yang bergerak hingga ke ujung buritan, sedangkan bagian luar lambung, aliran fluida terdistribusi dengan merata mengikuti bentuk lambung kapal hingga ke buritan. Desain ini cukup efisien bila beroperasi di sungai atau tempat sekitarnya cukup padat penghuni. Lambung trimaran *flat side inside* dapat dilihat pada Gambar 2 (A. Gibson, dan I.K.A.P. Utama, 2016).

1.2.2 Jenis Haluan Kapal

1. *Plumb Bow/Straight Bow*

Jenis haluan ini memiliki bentuk tegak lurus terhadap garis lunas kapal, memberikan stabilitas yang baik dan cocok untuk kapal yang beroperasi di laut terbuka.



Gambar 4. Haluan kapal plumb bow/straight bow

Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

2. *Raked Bow*

Jenis *Raked bow* memiliki desain memanjang dan miring ke belakang yang umum ditemukan pada kapal kayu tradisional maupun kapal mewah, berfungsi meningkatkan efisiensi berlayar dan nilai estetika.



Gambar 5. Haluan kapal *raked bow*
 Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

3. *Clipper Bow*

Awalnya *Clipper bow* awalnya dirancang untuk kapal cepat dengan bentuk haluan yang tajam dan tinggi, mampu menembus air dengan hambatan minimum.



Gambar 6. Haluan kapal *clipper bow*
 Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

4. *Spoon Bow*

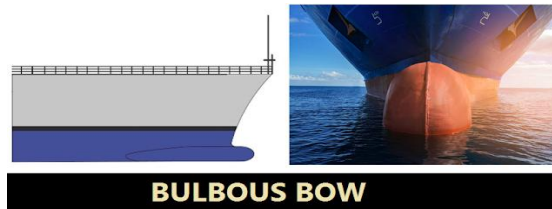
Tipe *Spoon bow* memiliki memiliki bentuk cembung menyerupai sendok, memberikan daya angkat tambahan pada haluan dan meningkatkan ketahanan terhadap gelombang.



Gambar 7. Haluan kapal *spoon bow*
 Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

5. *Bulbous Bow*

Bulbous bow adalah jenis haluan yang paling umum digunakan di kapal modern. Bagian depannya membentuk tonjolan bulat di bawah garis air yang mampu mengurangi hambatan gelombang, sehingga meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kestabilan kapal.

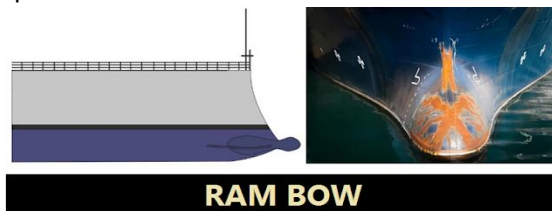


Gambar 8. Haluan kapal *bulbous bow*

Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

6. *Ram Bow*

Jenis *Ram bow* dirancang menyerupai ujung tombak dan biasanya digunakan pada kapal militer.



Gambar 9. Haluan kapal *ram bow*

Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

7. *Axe Bow*

Axe bow berbentuk tajam dan panjang ke depan, dengan bentuk menyerupai kapak, banyak digunakan pada kapal cepat karena kemampuannya memotong gelombang dengan resistansi minimal.



Gambar 10. Haluan kapal *axe bow*

Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

8. *Inverted Bow*

Inverted bow, atau *X-bow*, memiliki bentuk terbalik dengan bagian terpanjang berada di bawah garis air, efektif mengurangi gerakan pitching dan slamming, serta meningkatkan kenyamanan dalam kondisi laut berat.



Gambar 11. Haluan kapal inverted bow
Sumber : Ilmu Kapal dan Logistik, 2023

Dalam penelitian ini, bentuk haluan yang digunakan yaitu *inverted bow* sesuai dengan arahan pembimbing. Kapal dengan tipe haluan tersebut menjadi subjek utama analisis tentang karakteristik hidrodinamika kapal, terutama mengenai kemampuan dalam menghadapi kondisi laut yang memerlukan kestabilan serta kenyamanan dalam pelayaran.

1.2.3 Tahanan Kapal

Tahanan kapal, atau *resistance*, adalah gaya dari fluida yang menentang pergerakan kapal saat melaju di air. Gaya ini bekerja sejajar dengan arah gerak kapal dan mempengaruhi seberapa besar tenaga yang dibutuhkan agar kapal tetap melaju. Dengan demikian, pemahaman mengenai tahanan sangat penting untuk mendesain sistem propulsi yang efisien dan hemat energi (Harvald, 1992).

Studi mengenai tahanan kapal sangat penting karena berpengaruh besar terhadap efisiensi operasional, konsumsi bahan bakar, dan kecepatan kapal. Secara umum, tahanan kapal dibagi ke dalam beberapa komponen utama sebagai berikut :

a. Tahanan Gesek (*Friction resistance*)

Tahanan gesek muncul karena adanya gesekan antara fluida (air laut) dan permukaan basah kapal saat kapal melaju. Ketika kapal bergerak, fluida yang melewati permukaan lambung mengalami hambatan akibat viskositas, yang kemudian menghasilkan gaya gesek. Besarnya tahanan ini dipengaruhi oleh karakteristik fluida dan pola aliran di sekitar badan kapal. Tahanan ini termasuk ke dalam tahanan viskos, yakni tahanan yang dihasilkan dari energi yang hilang akibat gaya gesek fluida terhadap badan kapal. Jadi tahanan Viskos (RV) adalah komponen tahanan yang terkait dengan energi yang dikeluarkan akibat pengaruh viskos. (ITTC, 1957).

Tahanan gesek ini dipengaruhi oleh beberapa hal, sebagai berikut :

1) Angka Reynolds (*Renold's number*, R_n)

Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas yang mengkualifikasikan hubungan gaya tersebut dengan suatu kondisi laminar dan turbulent. Rumus bilangan Reynolds sebagai berikut :

$$R_n = \frac{V \times L}{\nu} \quad (1)$$

Dimana :

V : Kecepatan (m/s)

L : Panjang (m)

ν : Viskositas air (cP)

2) Koefisien gesek (*friction coefficient*, C_f)

$$C_f = \frac{0,075}{(\log Rn-2)^2} \quad (2)$$

(Merupakan formula dari ITTC)

3) Rasio kecepatan dan panjang kapal (*speed length ratio*, Slr)

$$Slr = \frac{Vs}{\sqrt{L}} \quad (3)$$

Dimana L adalah panjang antara garis tegak kapal (m) dan V_s adalah kecepatan kapal (m/s)

b. Tahanan Sisa (*Residual Resistance*)

Tahanan sisa adalah selisih antara tahanan total dengan tahanan gesek. Tahanan ini meliputi berbagai jenis hambatan yang tidak termasuk gesekan murni dari permukaan lambung kapal. Hambatan sisa terdiri dari ;

1) Tahanan Gelombang (*Wave Resistance*)

Tahanan gelombang adalah tahanan yang muncul akibat gelombang yang dihasilkan saat kapal melaju. Baik dalam kondisi laut tenang maupun bergelombang, gelombang yang terbentuk memerlukan energi, yang kemudian menghasilkan gaya tahanan.

2) Tahanan Udara (*Air Resistance*)

Tahanan udara, diartikan sebagai tahanan yang dialami oleh bagian kapal yang berada di atas permukaan air, termasuk bangunan atas (*superstructure*). Besarnya tahanan udara dipengaruhi oleh kecepatan kapal, bentuk dan luas permukaan atas, serta arah dan kecepatan angin relatif.

3) Tahanan Bentuk (*Form Resistance*)

Dihasilkan oleh bentuk geometris lambung kapal yang tercelup di bawah air. Semakin tidak streamline bentuknya, semakin besar tahanan yang terjadi karena gangguan pada aliran air.

4) Tahanan tambahan (*Added Resistance*)

Tahanan tambahan ini timbul karena pengaruh permukaan kapal yang kasar, peralatan eksternal seperti kemudi, serta pengaruh interaksi kapal dengan ombak atau arus. Perlu dicatat bahwa hasil pengujian model skala laboratorium tidak

sepenuhnya mewakili kondisi kapal sebenarnya karena permukaan kapal nyata tidak semulus model. (Arwini, 2018)

c. Tahanan total (*Total Resistance*)

Tahanan total merujuk pada keseluruhan gaya resistansi yang mempengaruhi laju gerak kapal saat melintasi permukaan air. Gaya ini timbul akibat interaksi antara badan kapal dan fluida tempat kapal beroperasi, serta merupakan kombinasi dari berbagai komponen tahanan seperti tahanan gesek, tahanan bentuk, dan tahanan gelombang. Tahanan ini berperan penting dalam menentukan efisiensi operasional kapal, terutama dalam hal kebutuhan daya penggerak dan konsumsi energi. Guldhammer dan Harvald (dalam Harvald, 1992) mengemukakan bahwa besar tahanan total yang dialami oleh kapal dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$R_T = \frac{1}{2} \rho C_T S V^2 \quad (4)$$

Dimana :

- R_T : Tahanan Total (N)
- ρ : Massa jenis Fluida (Kg/m^3)
- C_T : Koefisien tahanan total
- S : Luas bidang basah (m^2)
- V : Kecepatan (m/s)

Angka Froude dapat menjadi tolak ukur dalam menentukan jenis kapal apakah dalam kategori kapal cepat dan kapal non-cepat yang tentunya pemilihan koefisien bentuk kapal dalam rancangan (Rizqi, 2013). Berikut penggolongan F_n :

- a. Kapal lambat : $F_n < 0,20$
- b. Kapal sedang : $0,20 < F_n < 0,35$
- c. Kapal cepat : $F_n > 0,35$

Rumus *Froude number* dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \times LWL}} \quad (5)$$

Dimana :

- v : kecepatan kapal (m/s)
- g : percepatan gaya gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- l : panjang kapal (m)

$F_n V$ didefinisikan sebagai berikut :

$$F_n V = \frac{v}{g \times \sqrt[3]{V}} \quad (6)$$

Dimana :

- v : kecepatan kapal (m/s)
 g : percepatan gaya gravitasi ($9,81 m/s^2$)
 V : volume *displacement* kapal (m^3)

1.2.4 Autodesk CFD

Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) adalah perangkat lunak simulasi berbasis numerik yang digunakan untuk menganalisis aliran fluida, perpindahan panas, serta gaya-gaya fisik yang bekerja pada suatu sistem. Dalam konteks teknik perkapalan, *Autodesk CFD* banyak digunakan untuk memodelkan aliran fluida di sekitar lambung kapal, menganalisis distribusi tekanan, serta menghitung tahanan total kapal terhadap fluida, baik dalam kondisi diam maupun bergerak. Perangkat lunak ini memungkinkan analisis aliran air yang kompleks di sekitar geometri kapal dengan berbagai konfigurasi, termasuk kapal Trimaran, monohull, trimaran, dan jenis lainnya. *Autodesk CFD* menyediakan fitur-fitur seperti visualisasi aliran streamline, vektor kecepatan, distribusi tekanan, dan kemampuan simulasi terhadap variasi bentuk haluan seperti *inverted bow* serta karakteristik lambung seperti *flat side inside*.

Autodesk CFD memiliki beberapa modul utama yang mendukung proses analisis tahanan kapal, antara lain:

1. *CFD Simulation*
2. *Thermal Analysis*
3. *Flow Analysis*
4. *Pressure Drop Calculation*
5. *Heat Transfer*
6. *Multiphase Flow*

1.2.4.1 Autodesk CFD Simulation

Beberapa pengaturan dasar dan menu yang digunakan dalam *Autodesk CFD* untuk perhitungan tahanan kapal meliputi:

1. Pembuatan Model Geometri
 Menu: *File > Import CAD Model*
 Model geometri lambung kapal dapat dibuat menggunakan perangkat lunak CAD seperti Autodesk Inventor atau SolidWorks, kemudian diimpor ke dalam *Autodesk CFD* untuk dianalisis.
2. Penyusunan Mesh (*Meshing*)
 Menu: *Mesh Settings > Mesh Size*
 Mesh merupakan jaringan grid yang membagi volume fluida menjadi elemen-elemen kecil. Pengaturan ukuran mesh mempengaruhi akurasi hasil simulasi. Mesh yang lebih halus di area sekitar lambung kapal sangat disarankan untuk mendapatkan hasil yang optimal.
3. Pengaturan *Boundary Conditions* (Kondisi Batas)

Menu: *Boundary Conditions > Apply Conditions*

Beberapa kondisi batas yang umum digunakan meliputi:

- *Inlet Velocity*: menentukan kecepatan fluida masuk.
- *Outlet Pressure*: tekanan fluida pada saluran keluar.
- *Wall (No-slip)*: kondisi pada permukaan lambung kapal.
- *Symmetry Plane*: untuk menyederhanakan perhitungan simetri geometri kapal.

4. Pengaturan Properti Fluida

Menu: *Materials > Fluid Properties*

Pada pengaturan ini dimasukkan karakteristik fluida seperti:

- Densitas fluida (ρ)
- Viskositas dinamis (μ)

5. Pemilihan Solver

Menu: *Solve > Solution Settings*

Autodesk CFD memungkinkan pemilihan model aliran laminar atau turbulen. Untuk perhitungan tahanan kapal umumnya digunakan model turbulensi seperti *k-epsilon* atau *k-omega SST*.

6. Menjalankan Simulasi (Run Simulation)

Menu: *Solve > Run*

Setelah seluruh pengaturan selesai, simulasi dijalankan hingga konvergen. Lama waktu simulasi bergantung pada kompleksitas geometri dan kepadatan mesh yang digunakan.

7. Post-Processing (Analisis Hasil Simulasi)

Menu: *Results > Visualization Tools*

Setelah simulasi selesai, *Autodesk CFD* menyediakan beberapa fitur visualisasi hasil:

- *Velocity Field*: distribusi kecepatan fluida
- *Pressure Distribution*: distribusi tekanan di permukaan lambung
- *Streamlines*: visualisasi arah aliran fluida
- *Force Results*: gaya total termasuk tahanan kapal

1.2.4.2 Autodesk CFD Resistance Analysis

Dalam *Autodesk CFD*, tahanan total kapal dihitung berdasarkan gaya resultan dari distribusi tekanan dan gaya gesek fluida pada permukaan lambung. Prosedur analisis tahanan kapal meliputi:

1. Force Calculation

Menu: *Results > Forces > Total Forces*

Hasil perhitungan tahanan kapal dapat diperoleh dari hasil integrasi gaya normal (tekanan) dan gaya gesek (shear stress) pada permukaan lambung.

2. Drag Force Output

Menu: *Results > Reports > Drag Calculation*

Program akan menghasilkan laporan gaya tahanan total (total drag), yang merupakan komponen utama dalam evaluasi performa hidrodinamis kapal.

3. Visualization of Wake Formation

Menu: *Results > Streamlines > Wake Analysis*

Visualisasi pembentukan gelombang dan pusaran di belakang lambung kapal untuk menganalisis bentuk *wake* dan efisiensi propulsi.

4. Comparison at Various Speeds

Menu: *Boundary Conditions > Multiple Scenarios*

Autodesk CFD memungkinkan analisis tahanan kapal pada berbagai variasi kecepatan operasional sesuai dengan kecepatan desain kapal. Dengan bantuan *Autodesk CFD*, perancang kapal dapat melakukan optimasi bentuk lambung untuk meminimalisasi tahanan, meningkatkan efisiensi bahan bakar, serta memperbaiki performa kapal secara keseluruhan. (Autodesk, 2025)

1.2.4.3 Navier-Stokes Equation

Persamaan Navier-Stokes adalah dasar matematis yang digunakan dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menggambarkan pergerakan fluida. Persamaan ini memformulasikan hukum kekekalan momentum dan massa dalam fluida, serta mengakomodasi gaya-gaya yang bekerja seperti tekanan, gaya viskos, dan gaya eksternal lainnya (Versteeg & Malalasekera, 2007). Dalam bentuk umum untuk fluida inkompresibel, persamaan Navier-Stokes dituliskan sebagai berikut:

1. Persamaan Kontinuitas (*Conservation of Mass*):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (7)$$

2. Persamaan Momentum (*Conservation of Momentum*):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}) = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

3. Persamaan Energi (*Conservation of Energy*):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j e_0 + u_j p + q_j - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (9)$$

Keterangan:

- ρ : densitas fluida
- u_i, u_j : komponen kecepatan fluida
- p : tekanan
- δ_{ij} : delta Kronecker
- τ_{ij} : komponen tegangan viskos
- e_0 : energi total per satuan massa
- q_j : fluks panas
- t : waktu
- x_j : komponen posisi

Persamaan ini digunakan oleh *Autodesk CFD* untuk menghitung bagaimana fluida bergerak dan berinteraksi dengan permukaan objek dalam model simulasi. Dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara numerik menggunakan metode diskretisasi, *Autodesk CFD* mampu memprediksi distribusi kecepatan, tekanan, dan parameter fisik lainnya secara detail dalam ruang dan waktu. (CFD Online Wiki, n.d.).

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak antar lambung terhadap nilai tahanan total kapal trimaran dengan konfigurasi *outriggers* asimetris *flat side inside* dan lambung utama berbentuk *inverted bow*?
2. Bagaimana variasi jarak antar lambung memengaruhi nilai tahanan dan pola aliran air di sekitar kapal berdasarkan hasil simulasi menggunakan *Autodesk CFD*?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Fokus utama penelitian adalah pada analisis kapal Trimaran yang menggunakan konfigurasi lambung asimetris dengan sisi datar di bagian dalam (*flat side inside*) serta bentuk haluan *inverted bow*.
2. Variasi jarak antar lambung (*hull spacing*) yang dikaji dibatasi pada rentang nilai yang sesuai dan relevan untuk desain kapal Trimaran.
3. Perhitungan tahanan kapal dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Autodesk CFD*.
4. Penelitian ini tidak menelaah aspek struktur kapal maupun pemilihan material yang digunakan dalam konstruksi kapal.

1.5 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan dampak penggunaan desain lambung Trimaran asimetris *flat side inside* dan haluan *inverted bow* terhadap nilai tahanan kapal.
2. Menentukan pengaruh variasi jarak antar lambung terhadap besarnya tahanan kapal dengan menggunakan simulasi berbasis *Autodesk CFD*.

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai bahan pertimbangan teknis bagi perancang kapal dalam perencanaan desain lambung Trimaran yang lebih efisien secara hidrodinamika.
2. Sebagai referensi dan landasan awal bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan serta optimasi desain kapal Trimaran di masa mendatang.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidrodinamika Kapal Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Pelaksanaan penelitian ini terhitung mulai dari bulan Juni 2025 sampai selesai.

2.2 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini berbasis simulasi numerik menggunakan aplikasi *Autodesk CFD*, dilakukan untuk mendapatkan nilai tahanan pada kapal Trimaran dengan variasi jarak lambung asimetris *flat side inside* dan *inverted bow*.

2.3 Metode Pengumpulan Data

Jenis data dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Data primer
Data primer atau langsung dalam penelitian ini berupa data tahanan total kapal Trimaran asimetris *flat side inside* dengan desain haluan *inverted bow* yang diperoleh melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Autodesk CFD*.
2. Data sekunder
Data sekunder atau tidak langsung, merupakan data yang diperoleh melalui bahan-bahan tertulis dari sumber data yang erat kaitannya dengan penelitian ini. Setelah data sekunder kapal terkumpul, kemudian data akan diverifikasi untuk persiapan pemodelan kapal. Kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis kapal Trimaran. Data sekunder dalam penelitian ini adalah :
 - A. Kajian Pustaka, merupakan metode pengambilan data dengan cara mempelajari literatur yang relevan dengan studi yang dilakukan.
 - B. Data Umum
 - a. Tipe kapal = Kapal Penumpang
 - b. *Gross Tonage* = 100 MT
 - c. Jenis material kapal = Aluminium

C. Ukuran Utama Kapal

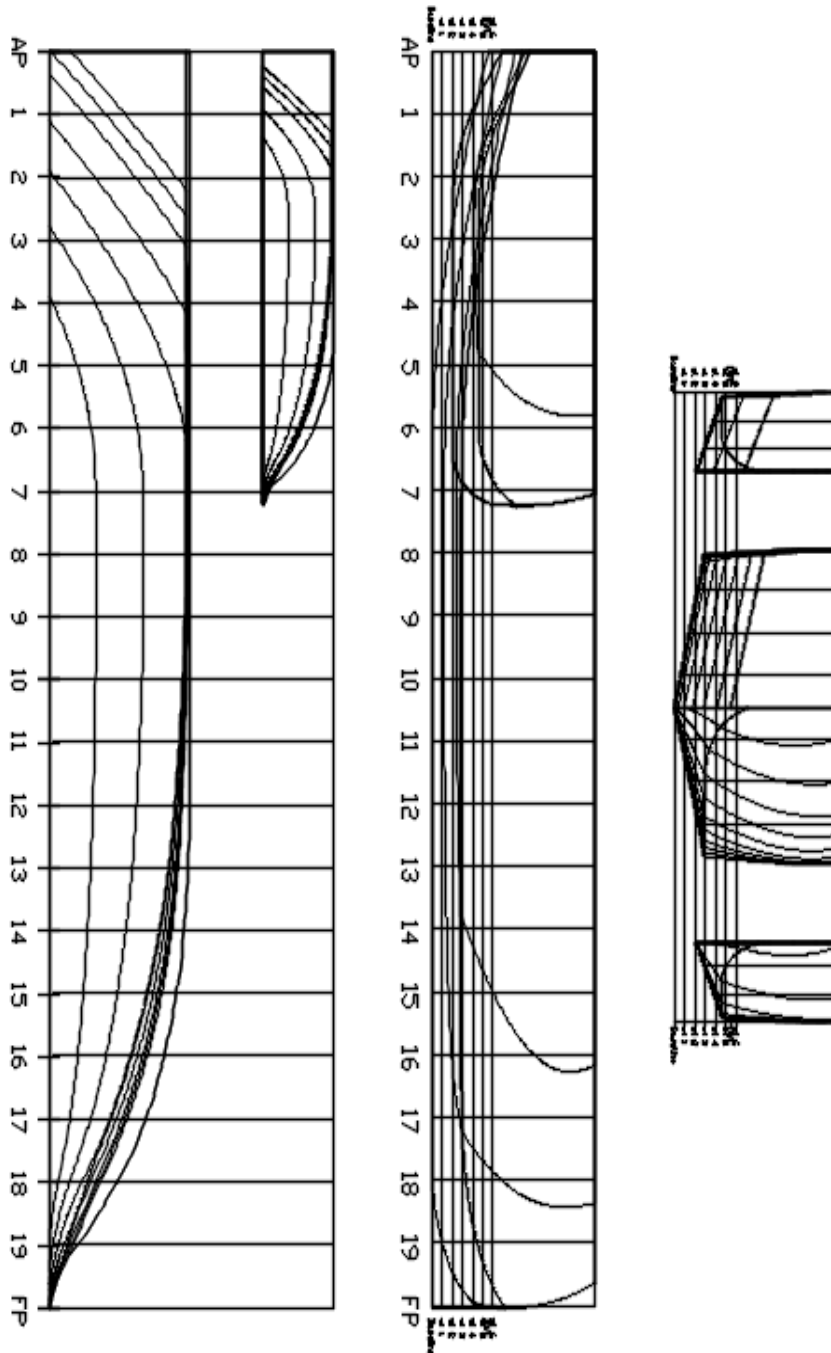
Tabel 1 menunjukkan data ukuran utama kapal.

Table 1. Data ukuran utama kapal

No	Ukuran Utama	Main Hull	Side Hull	Satuan
1	Length Over All (LOA)	16	5,78	m
2	Length Water Line (LWL)	15,97	5,45	m
3	Breadth (B)	4	1	m
4	Depth (H)	2,3	2	m
5	Draught (T)	0,87	0,57	m
7	Tunnel Width	1	1	m

D. Rencana Garis Air (*Lines Plan*)

Gambar 12. Lines Plan
 Sumber : Hasil olah data



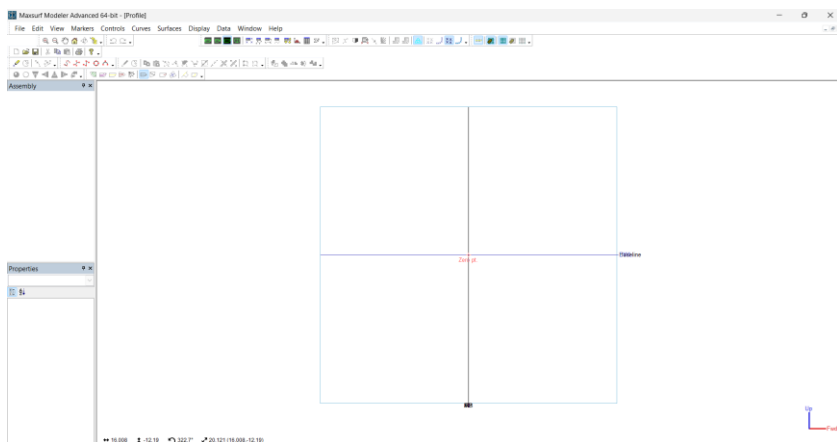
2.4 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan bantuan *software* Maxsurf Modeller dan Rhinoceros 8 untuk melakukan pemodelan kapal serta *Autodesk CFD* untuk mensimulasi dan *run-up* dari rekayasa penelitian yang dibuat, yaitu menghitung tahanan yang dihasilkan oleh model kapal. Adapun teknik pengolahan data yang digunakan sebagai berikut:

2.4.1 Pemodelan Kapal Trimaran

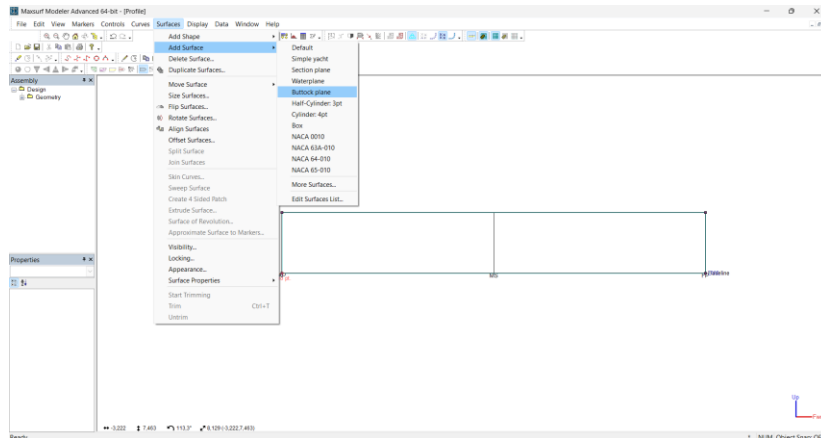
Pada tahapan ini, dilakukan pemodelan 3D kapal Trimaran sesuai dengan lines plan. Adapun Langkah-langkah pembuatan model kapal Trimaran di *software* Maxsurf Modeller yaitu sebagai berikut:

1. Membuka program *Maxsurf Modeller*, lalu pilih *profile* atau tampak samping yang dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Tampilan *profile*
Sumber: Hasil olah data

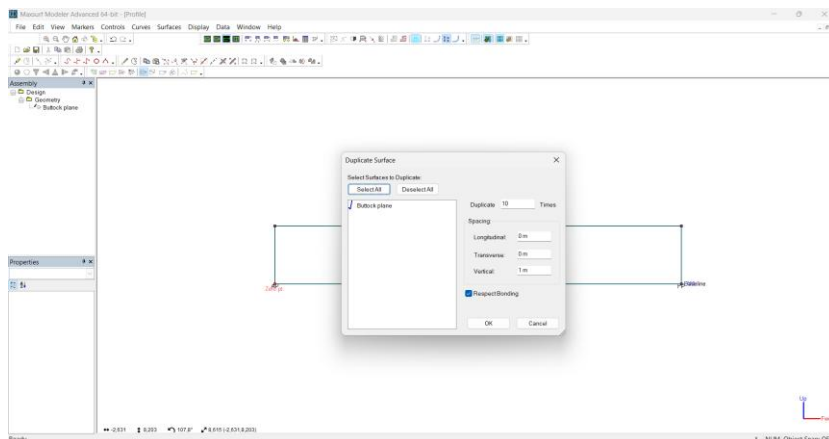
2. Pilih menu *Surface* lalu *Add Surface* dan pilih *Buttock Plane*. Selanjutnya, masukkan ukuran panjang kapal *Length Over All* (LOA) di tampilan *Long Pos* yang dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Tampilan *add surface*

Sumber: Hasil olah data

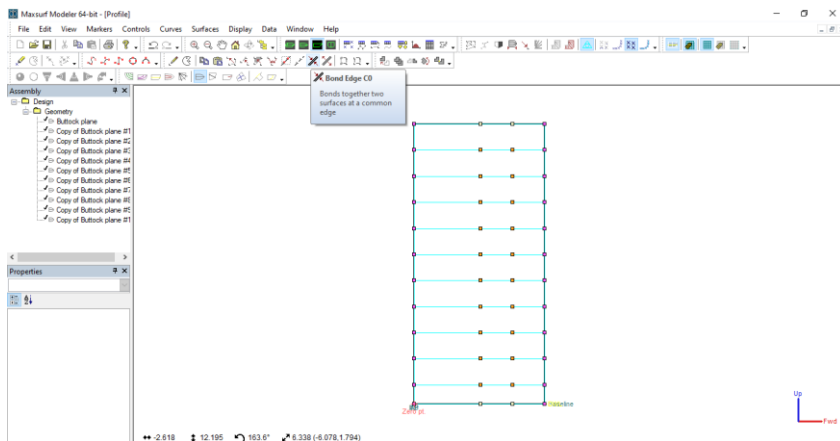
3. Selanjutnya tambahkan *Add Control Point*. Setelah itu, pilih menu *Surface* lalu *Duplicate Surface* sebanyak 10 karena yang di desain adalah kapal Trimaran maka harus diperbanyak *Surface* yang dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Tampilan *duplicate surface*

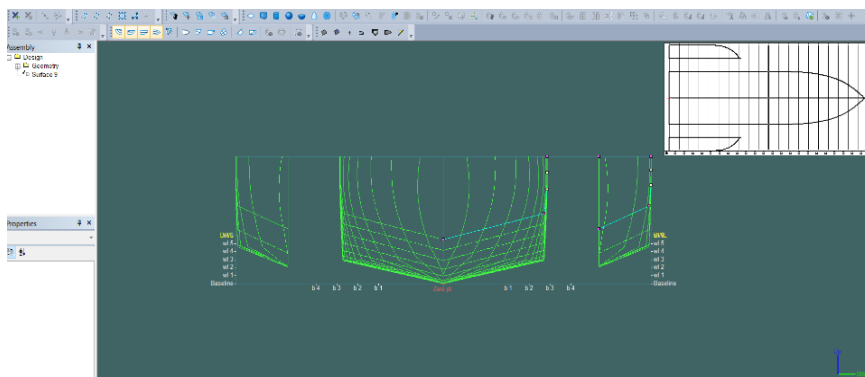
Sumber: Hasil olah data

4. Setelah sudah di *Duplicate Surface* kemudian disambungkan masing-masing *Surface* dengan memblok surfacenya lalu pilih menu *Bond Edge* yang dapat dilihat pada Gambar 16.



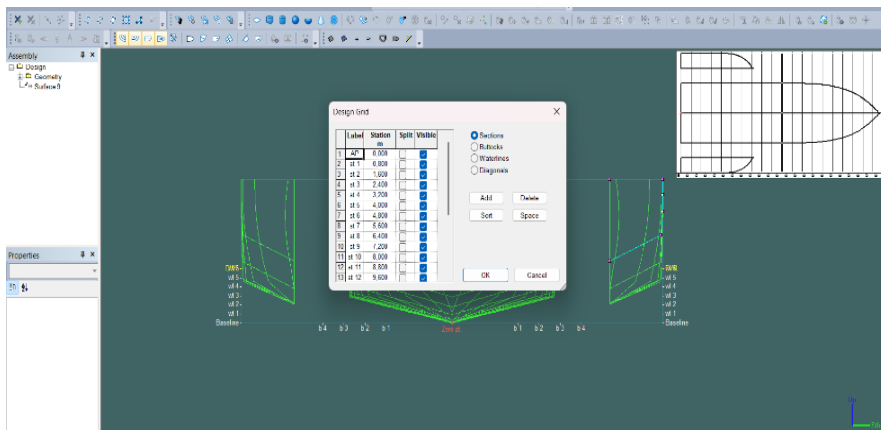
Gambar 16. Tampilan setelah di *bond edge* setiap *surface*
Sumber: Hasil olah data

5. Selanjutnya masuk di tampak *body plan*, lalu *Surface* tersebut kita buka satu persatu. Selanjutnya kita sesuaikan bentuk lambung pada kapal Trimaran yang dapat dilihat pada Gambar 17.



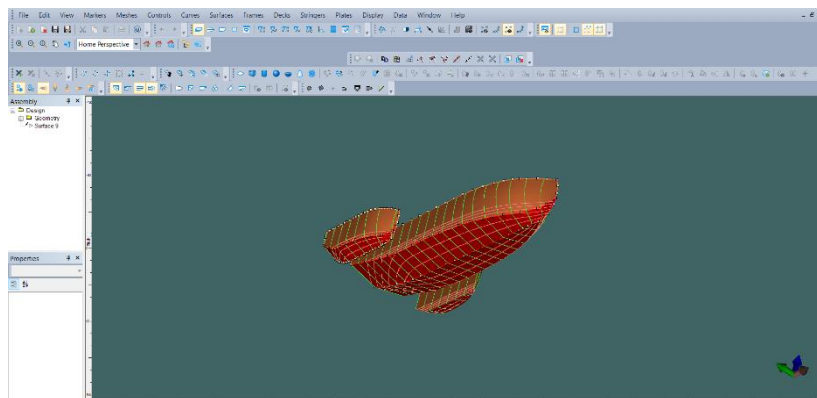
Gambar 17. Pembuatan model lambung
Sumber: Hasil olah data

6. Setelah bentuk lambung atau *body plan* nya sudah jadi. Pilih menu data lalu *Design Grid*, tambahkan jumlah *Sections*, *Buttock*, dan *Waterlines* yang dapat dilihat Gambar 18.



Gambar 18. Tampilan data *Design Grid* untuk *section*, *buttock*, *waterplane*
Sumber: Hasil olah data

- Jadilah model 3D kapal Trimaran sesuai dengan lines plan kapal tersebut yang dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Tampilan Model Kapal Trimaran
Sumber: Hasil olah data

2.4.2 Variasi Jarak Lambung Model Kapal Trimaran

Pada penelitian ini, lebar kapal dan volume displacementnya tidak dipertimbangkan serta sarat kapal yang digunakan konstan. Penelitian ini hanya mempertimbangkan variasi jarak lambung. Dalam tahapan ini, dilakukan variasi jarak lambung pada model kapal yang telah dibuat menggunakan program *Maxsurf Modeller*. Penelitian ini menggunakan 4 variasi jarak lambung dan dapat dilihat pada Tabel 2.

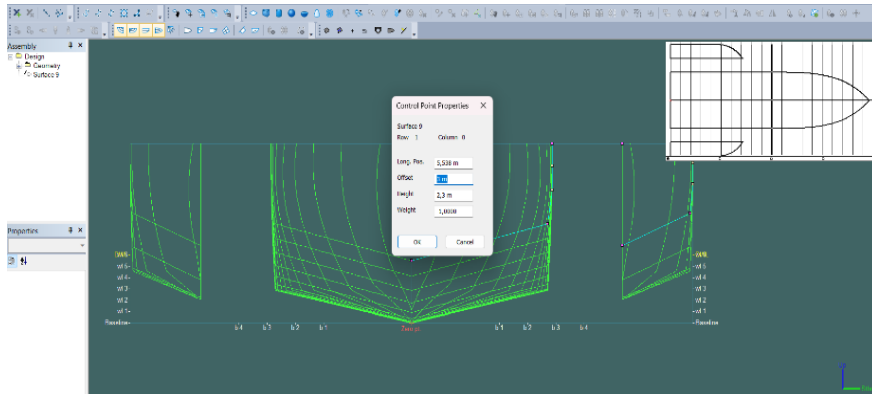
Table 2. Variasi jarak lambung

No	Variasi	Jarak Lambung (m)	Jarak Lambung Setelah Menggunakan Skala 1:35 (m)
1	Variasi Awal Kapal	1	0.029
2	Variasi Jarak Lambung 1	1.4	0.040
3	Variasi Jarak Lambung 2	1.8	0.051
4	Variasi Jarak Lambung 3	2.2	0.063
5	Variasi Jarak Lambung 4	2.6	0.074

Sumber: Hasil olah data

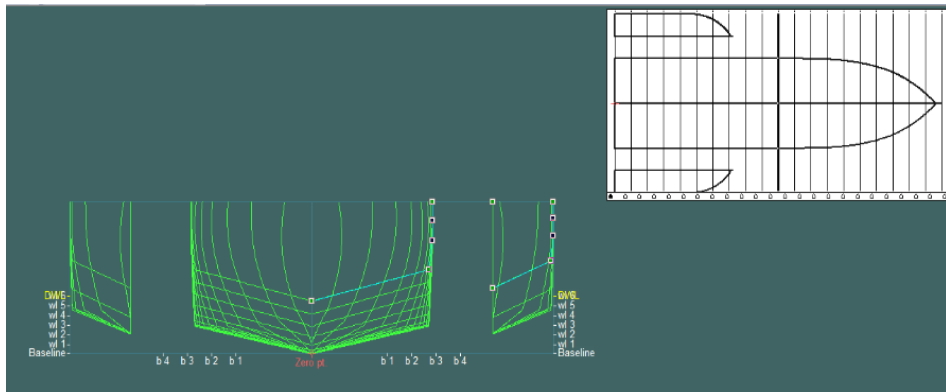
Adapun Langkah-langkah dalam memberikan variasi jarak lambung menggunakan program Maxsurf Modeller yaitu sebagai berikut :

1. Setelah model kapal Trimaran selesai dibuat dengan menggunakan Maxsurf Modeller, Model yang sudah jadi tersebut diubah jarak antara lambungnya dengan cara pada tampilan *body plan* di blok lambung kapalnya lalu pilih menu group, setelah itu tekan salah satu control point pada lambungnya. Maka akan muncul menu *control point properties*, pada menu tersebut terdapat nilai *offset* lalu masukkan nilai sesuai dengan variasi jarak lambungnya yang artinya model akan mengalami perubahan jarak antara lambungnya dapat dilihat pada Gambar 20.

**Gambar 20.** Tampilan menu perubahan jarak

Sumber: Hasil olah data

2. Model akan mengalami perubahan penambahan jarak antara lambung dapat dilihat pada Gambar 21.

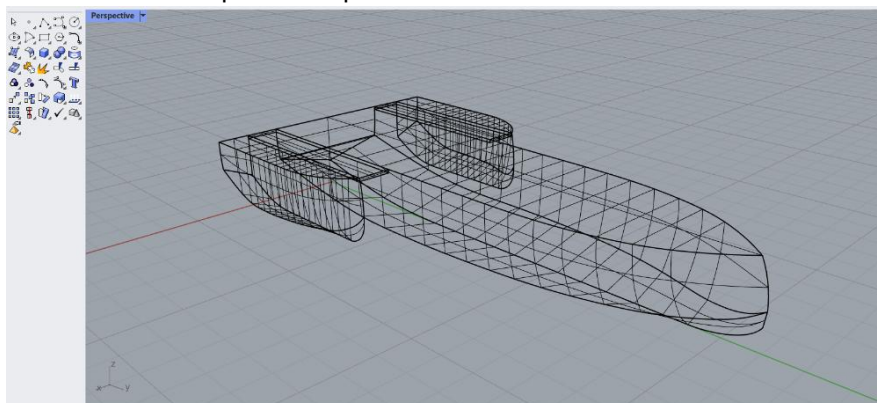


Gambar 21. Tampilan *Body Plan* Kapal setelah perubahan jarak
Sumber: Hasil olah data

2.4.3 Pemodelan Ulang Menggunakan Rhinoceros 8

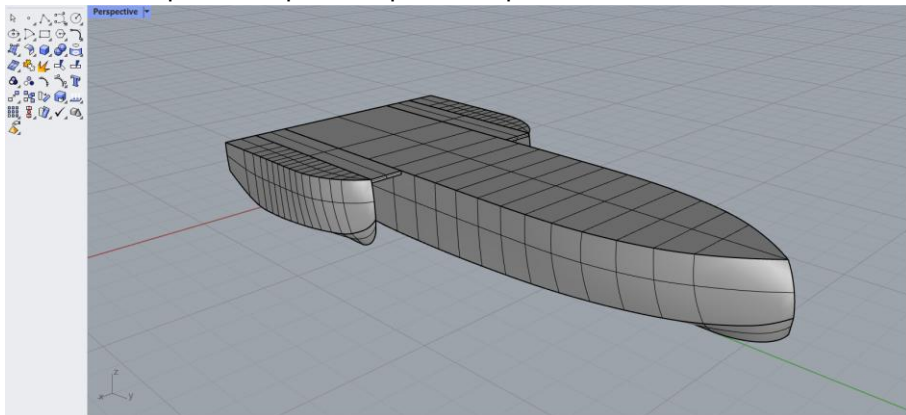
Kemudian gambar yang diperoleh akan diubah jenis dan modelnya dibuat dalam bentuk solid dengan menggunakan Rhinoceros 8, tujuannya adalah agar model kapal menjadi solid dan dapat disimulasikan menggunakan *Autodesk CFD*. Berikut langkah-langkah untuk membuat model kapal menjadi solid :

1. Buka *Software* Rhinoceros 8 dan *import* file model kapal yang telah dibuat pada Maxsurf Modeller dapat dilihat pada Gambar 22.



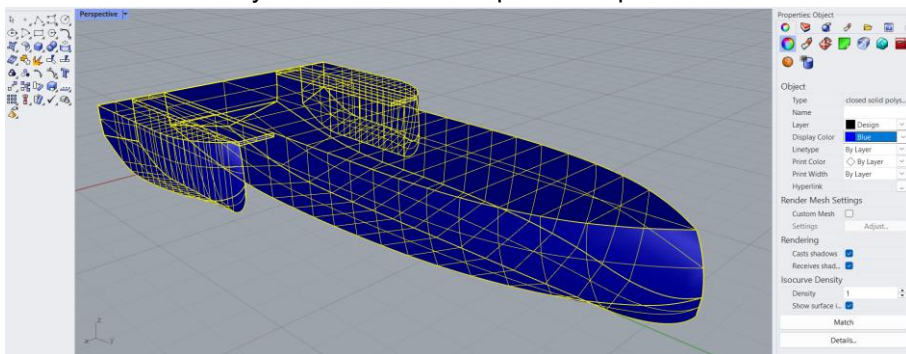
Gambar 22. Import file Maxsurf ke Rhinoceros 8
Sumber: Hasil olah data

- Setelah itu dilakukan penggambaran ulang menggunakan tool *Surface* agar semua sisi kapal tertutup dan dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Penggambaran ulang model kapal pada Rhinoceros 8
Sumber: Hasil olah data

- Setelah menggambar semua permukaan kapal, selanjutnya dilakukan penggabungan *surface* dengan perintah *join*. Penggabungan ini dilakukan agar model menjadi solid. Jika muncul tulisan *Closed Polysurface* pada bagian kanan atas maka model dinyatakan solid dan dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Hasil model close solid
Sumber: Hasil olah data

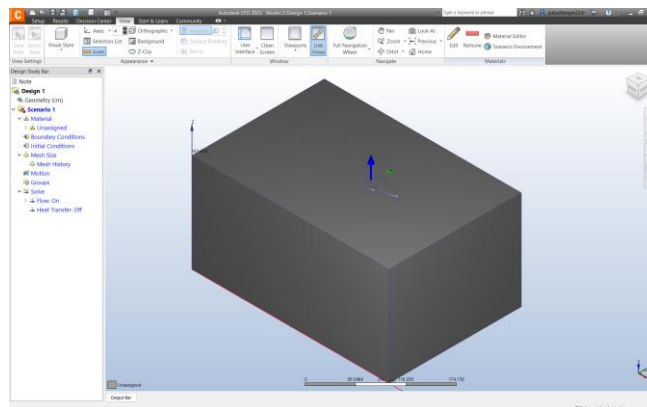
Selanjutnya model yang telah solid di *export* dalam format rhino 3-D model (.3dm) kemudian dilakukan simulasi pada *Software Autodesk CFD*.

2.4.4 Simulasi Model Kapal Menggunakan *Autodesk CFD*

Simulasi numerik yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan *software Autodesk CFD 2024*. Simulasi ini terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Geometry

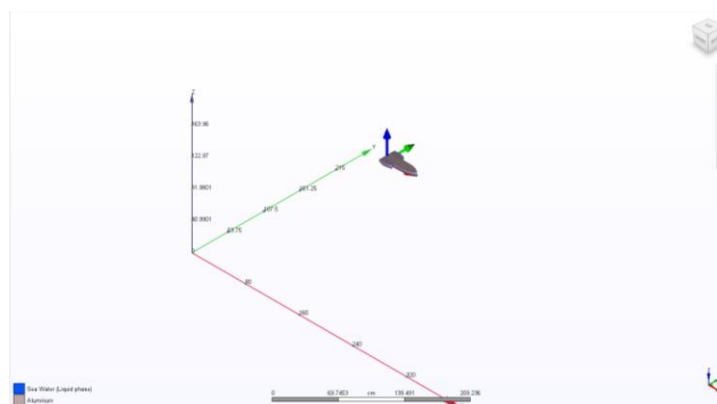
Tahap *Geometry* adalah tahap pemodelan, yaitu penentuan model yang akan di analisa, diantaranya satuan ukuran yang akan digunakan, menghubungkan ujung model yang kurang dari toleransi yang ditentukan (*merge edge*), menghapus objek kecil baik pada permukaan (*surface*) maupun ujung permukaan (*edge*) yang biasanya sangat sulit terlihat. Pada proses ini tidak dilakukan pemodelan *Boundary Layer* dikarenakan sebelumnya telah dilakukan pada *software* Rhinoceros 8. Adapun visualisasi tahap *geometry* pada tahap ini sebagai berikut.



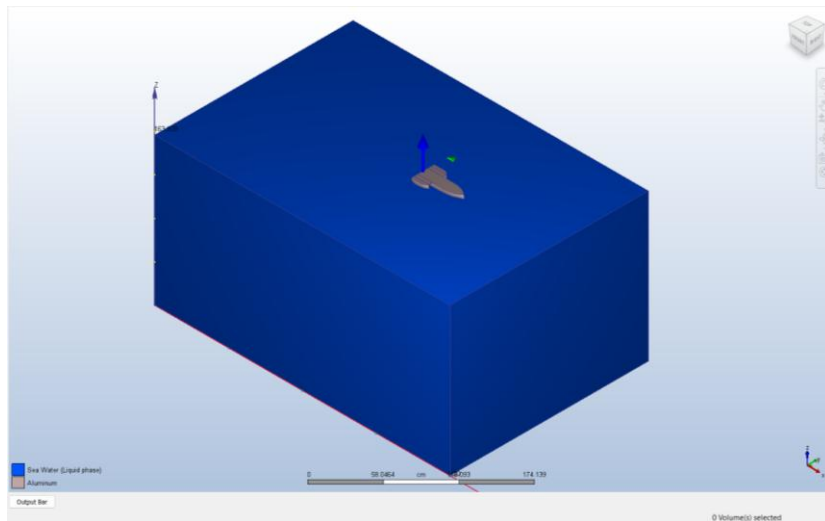
Gambar 25. Visual tahap geometry model kapal dan boundary layer
Sumber : Hasil olah data

2. Material

Tahap material adalah tahap pendefinisian jenis material, proses *input* untuk penelitian ini ada 2 tipe yaitu, tipe solid dengan jenis aluminium untuk model kapal dan fluid dengan jenis *sea water (liquid phase)* untuk *boundary layer*. Adapun visualisasi input material sebagai berikut.



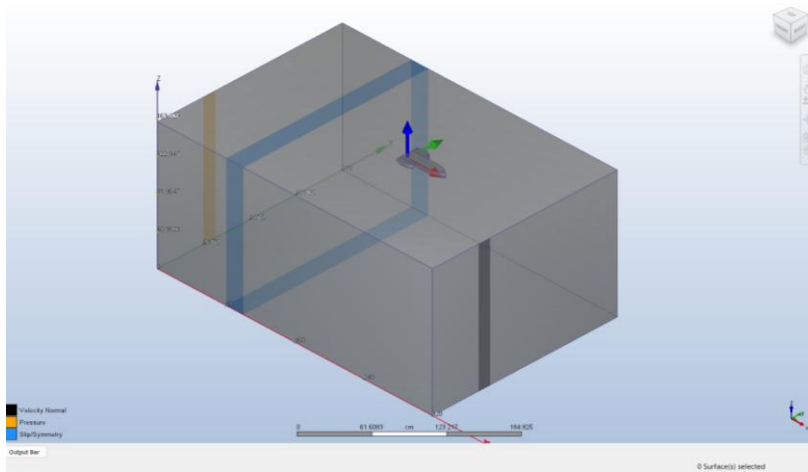
Gambar 26. Visualisasi input material model kapal
Sumber : Hasil olah data



Gambar 27. Visualisasi input material model kapal dan boundary layer
Sumber : Hasil olah data

3. *Boundary Condition*

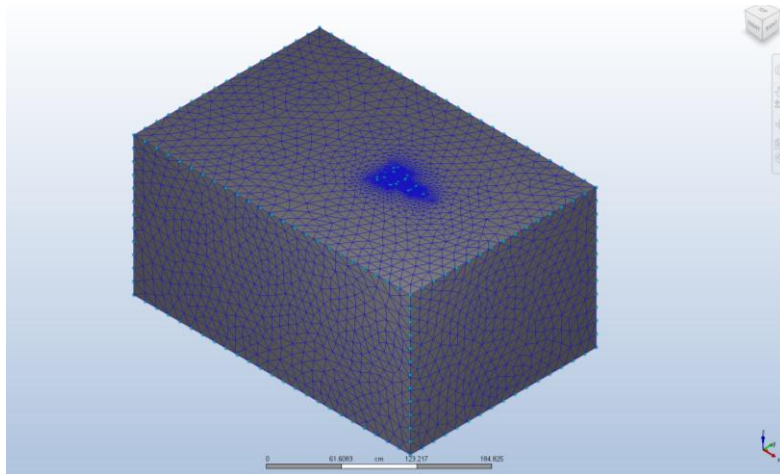
Tahap *boundary condition* adalah proses input kecepatan (*velocity*), tekanan (*pressure*) dan kondisi slip/symmetry pada dinding tangki pengujian. Kecepatan didefinisikan sebagai kecepatan fluida yang mempunyai nilai sama dengan kecepatan kapal diletakkan pada dinding didepan haluan dan berlawanan arah dengan model kapal (inlet) sedangkan untuk *pressure* diletakkan pada dinding di belakang buritan (outlet) dan pada dinding samping, atas dan bawah model kapal dikondisikan sebagai slip/symmetry artinya pada permukaan dinding tersebut fluida dibiarkan mengalir bebas. Adapun visualisasi input *boundary condition* sebagai berikut.



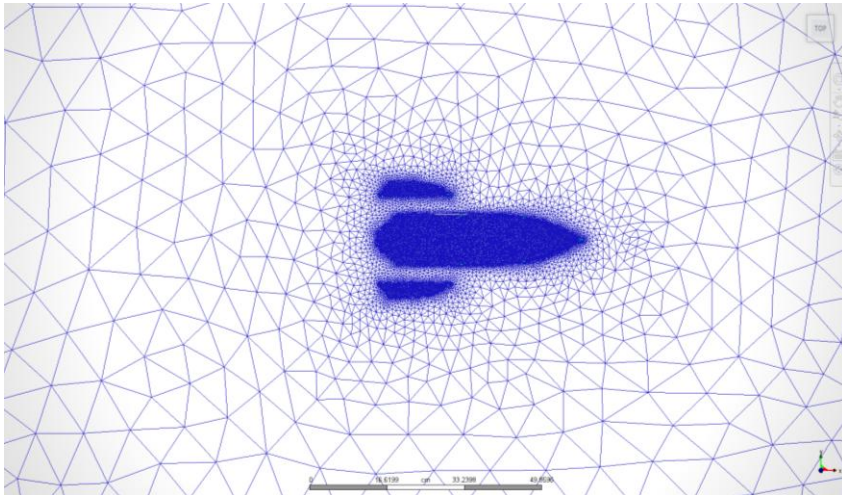
Gambar 28. Visualisasi input boundary condition model kapal dan boundary layer
Sumber : Hasil olah data

4. Mesh Sizing

Tahap *mesh sizing* merupakan tahap membagi geometri model menjadi bagian – bagian kecil yang disebut elemen dan disetiap ujung elemen disebut sebagai *nodes*. Metode yang digunakan yaitu *Finite Element Method (FEM)*.



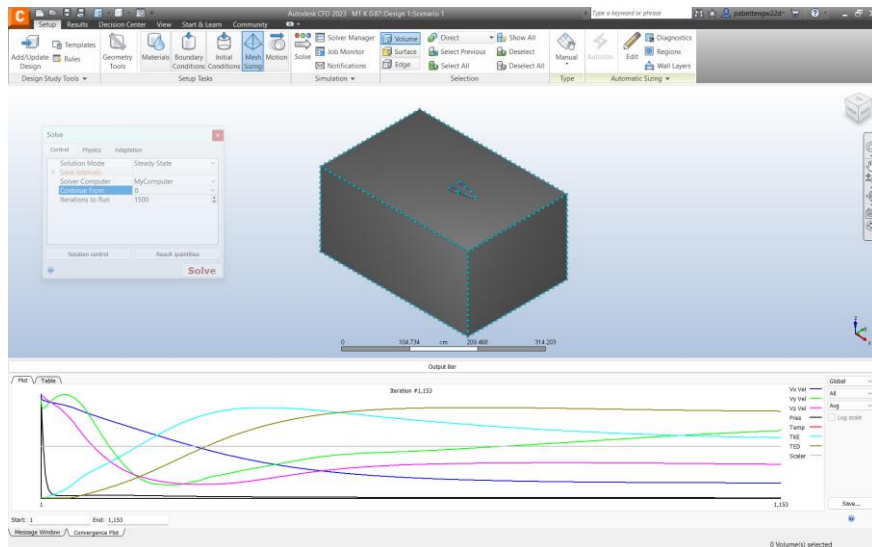
Gambar 29. Visualisasi mesh sizing model kapal dan boundary layer
Sumber : Hasil olah data



Gambar 30. Visualisasi mesh sizing model kapal
Sumber : Hasil olah data

5. Solve

Solve adalah tahapan proses menjalankan perhitungan numerik. Setelah semua komponen *input* dan *output* telah dimasukkan, selanjutnya dilakukan proses *solve*. Sebelum melakukan proses tersebut terlebih dahulu dilakukan kontrol terhadap hasil yang diinginkan dan penentuan karakteristik fisika pada aliran fluida, diantaranya *solution mode*, jumlah iterasi, *result quantities*, penentuan *automatic convergence assesment*, *compressibility flow*, dan *turbulence*. Pada penelitian ini *solution mode* yang digunakan adalah aliran fluida steady state dengan total sekitar 1000-an iterasi per kecepatan kapal dan jenis aliran fluida yang digunakan adalah turbulen dengan persamaan model standart k-epsilon ($k-\epsilon$). Sedangkan untuk memudahkan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan maka digunakan *automatic convergence assasment* dengan tujuan. Ketika proses *solve* telah mendapatkan hasil yang *convergence* maka secara otomatis proses akan berhenti dengan sendirinya. Adapun Visualisasi tahap solve sebagai berikut.



Gambar 31. Visualisasi tahap solve model kapal dan boundary layer
Sumber : Hasil olah data

2.4.5 Verifikasi Data

Pada tahap ini, hasil simulasi yang didapatkan akan diverifikasi sesuai persyaratan yang telah ditentukan. Jika hasil simulasi tidak memenuhi persyaratan, maka dilakukan pengecekan ulang terhadap pemodelan serta tahapan simulasi yang telah dikerjakan sebelumnya. Adapun dilakukannya verifikasi apabila beberapa kondisi di bawah ini ditemukan.

1. Jika pemodelan yang dilakukan tidak sesuai dengan karakteristik hidrostatik kapal sebenarnya.
2. Jika syarat perbandingan model kapal tidak memenuhi.
3. Jika proses running tidak dapat dilakukan.
4. Jika hasil simulasi yang didapatkan tidak logis.

Apabila kondisi diatas tidak ditemukan, maka selanjutnya dilakukan proses analisis terhadap data hasil yang didapatkan.

2.4.6 Analisis Data

Setelah proses running dan verifikasi telah selesai, maka secara otomatis *software* mengeluarkan beberapa hasil sesuai parameter dan karakteristik yang telah diinput. Adapun hasil yang dikeluarkan antara lain:

1. Hambatan (*drag force*)
2. Distribusi *static pressure*
3. *Velocity magnitude*

4. Visualisasi karakteristik aliran fluida yaitu *static pressure*, *velocity magnitude* dan sebagainya.

Berdasarkan hasil tersebut, maka akan dilakukan analisis dengan melihat parameter keberhasilan simulasi yang telah ditentukan oleh software tersebut.

Adapun parameter yang dimaksudkan sebagai berikut :

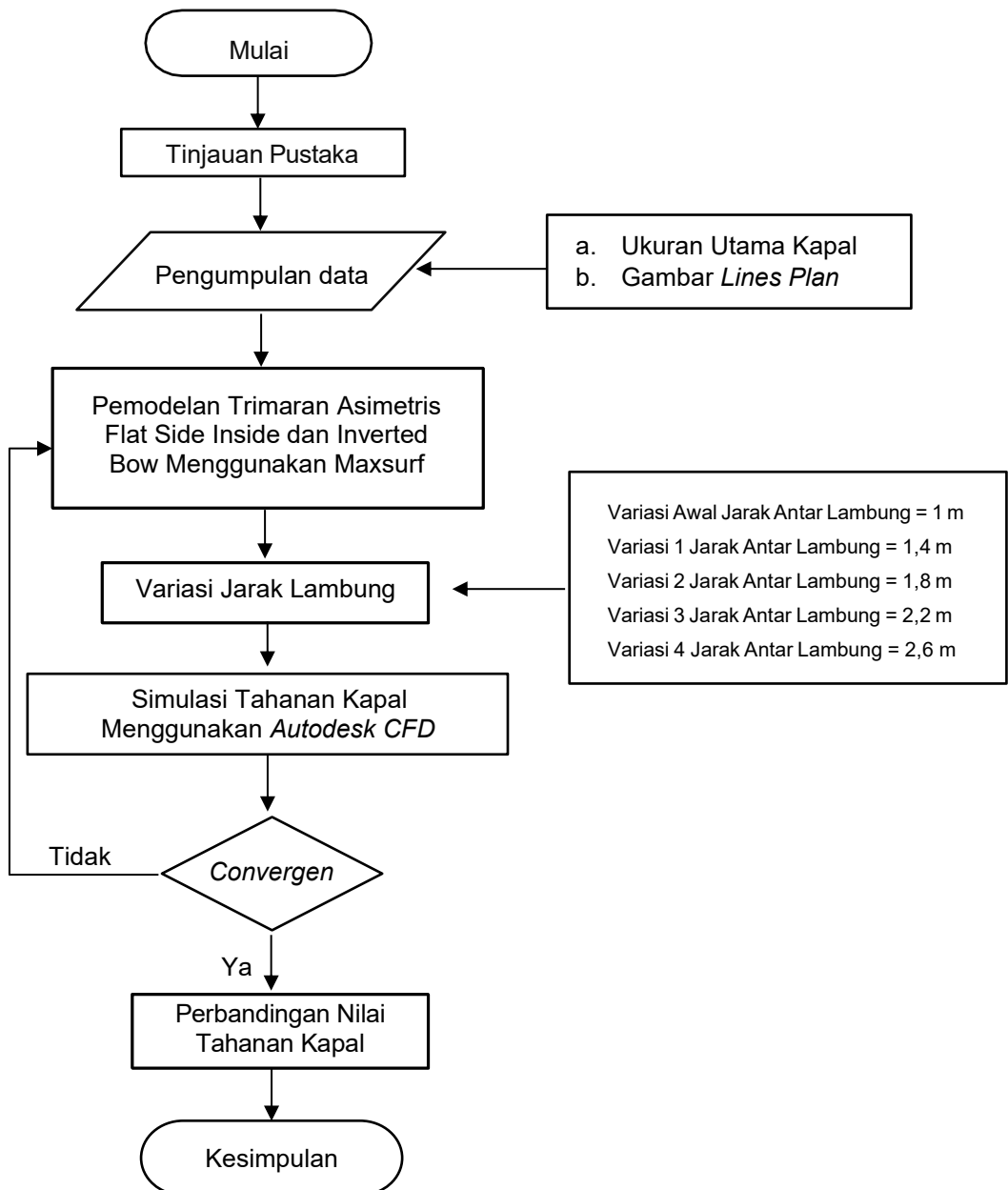
1. Konvergensi, yaitu property metode numeric untuk menghasilkan penyelesaian eksakta sebagai *grid spacing*, ukuran kontrol *volume* atau ukuran elemen dikurangi mendekati nol. Konvergensi biasanya sulit untuk didapatkan secara teoritis. Untuk kondisi lapangan kesamaan *Lax* yang menyatakan bahwa permasalahan linear memerlukan konvergensi.
2. Nilai *Residual In* dan *Residual Out*, yaitu dalam proses simulasi eksternal flow seperti pada penelitian ini parameter keberhasilan ditentukan dengan kedua nilai tersebut. Jika nilai residual out lebih kecil dibandingkan *Residual In* dan nilai *Residual Out* berkisar pada angka 10^{-8} , maka dapat disimpulkan keberhasilan simulasi dalam membaca input kondisi yang telah kita lakukan relatif tinggi.

2.4.7 Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini, dilakukan penarikan kesimpulan terhadap analisis yang dilakukan dalam penelitian.

2.5 Kerangka Pikir

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian disusunlah kerangka pikir penelitian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Kerangka Pikir Penelitian