

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal Phinisi, sebagai warisan budaya maritim suku Bugis-Makassar yang bercirikan dua tiang dan tujuh layar serta diakui UNESCO sebagai Warisan Budaya Tak benda Dunia pada tahun 2017, tidak hanya menjadi simbol identitas bangsa Indonesia tetapi juga daya tarik wisata bahari tradisional yang mencerminkan kearifan lokal dan prospek pengembangan industri maritim di Bulukumba (Akhmad et al., 2020; Ardiwidjaja, 2016). Pembuatan kapal Phinisi di Bontobahari, Bulukumba melibatkan proses tradisional yang kompleks dan terstruktur, dimulai dari persiapan material, pemotongan lunas, pemasangan badan kapal yang meliputi dinding kapal dan rangka (*frame*), pembangunan dek, ruang-ruang kapal, pembuatan layar dan tiang, pengecatan, instalasi mesin dan kemudi, hingga peluncuran akhir kapal (Akhmad et al., 2022). Struktur kapal Phinisi memegang peranan penting dalam menjaga keberlanjutan warisan budaya sekaligus ketahanan konstruksi kapal, sebab penggunaan kayu sebagai material utama pada lambung memerlukan perencanaan yang efisien dan akurat untuk menjamin kekuatan serta ketersediaan material yang semakin terbatas (Alamsyah et al., 2022).

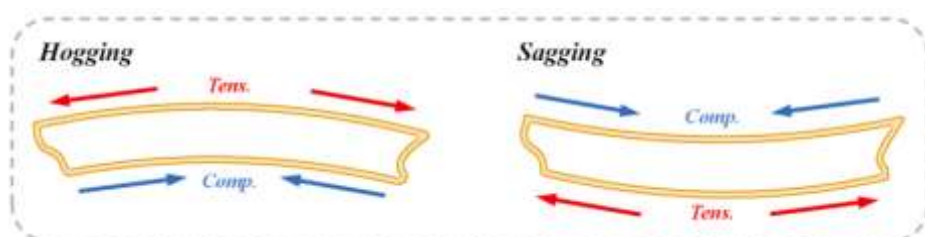
Masalah kekuatan struktur kayu pada kapal tradisional Phinisi terutama timbul dari keterbatasan dan kualitas material kayu seperti pada gambar 1.1, metode konstruksi berbasis pengetahuan turun-temurun tanpa perencanaan teknis formal, serta beban operasional (*seakeeping*, peluncuran, muatan) yang menimbulkan konsentrasi tegangan pada sambungan dan elemen rangka lambung sehingga berisiko menurunya kekedapan dan integritas Struktur, penelitian-penelitian rekayasa menunjukkan perlunya pendekatan analitis modern (analisis elemen hingga, optimasi appendage seperti bilge-keel, atau penguatan lokal) untuk menilai dan memperkuat lambung tradisional tanpa menghilangkan karakter budaya kapal, sehingga keberlanjutan konstruksi Pinisi dapat dijaga sambil meningkatkan keselamatan dan performa operasional (Noegraha et al., 2025; Zamarin et al., 2025).



(Sumber : Hasil Survey lapangan)

Gambar 1. 1 Gambar Pekerjaan Struktur lambung kapal phinisi

Beban gelombang laut pada kondisi hogging dan sagging berperan signifikan dalam menentukan respons Struktur kapal terhadap momen lentur vertikal. Pada kondisi sagging, struktur geladak mengalami tegangan tekuk sementara struktur alas (bottom) mengalami tegangan tarik. Sebaliknya, pada kondisi hogging, geladak mengalami tegangan tarik dan alas mengalami tegangan tekuk seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.2. Apabila kondisi pembebanan tersebut melampaui kekuatan batas struktur, maka Kegagalan Struktur dapat terjadi (Cui et al., 2024; Liu & Guedes Soares, 2020).



(Cui et al., 2024; Liu & Guedes Soares, 2020)

Gambar 1. 2 Kondisi Sagging dan Hogging

Kekuatan memanjang kapal merupakan kemampuan struktur utama kapal (hull girder) dalam menahan momen lentur global yang timbul akibat distribusi berat dan beban gelombang laut. Kondisi pembebanan tersebut umumnya terjadi dalam bentuk hogging dan sagging, yang menyebabkan tegangan maksimum pada elemen Struktur memanjang kapal. Analisis kekuatan memanjang banyak dilakukan menggunakan Finite Element Method (FEM) karena metode ini mampu merepresentasikan perilaku struktur secara detail dan akurat (Popa et al., 2024). Berdasarkan penelitian (Popa et al., 2024), analisis FEM menunjukkan bahwa balok memanjang kapal memiliki peran dominan dalam menahan tegangan akibat momen lentur global. Sedangkan (Sunardi et al., 2025) menjelaskan bahwa penguatan struktur lambung secara memanjang dapat memperbaiki distribusi beban sepanjang badan kapal, sehingga meningkatkan kapasitas kekuatan memanjang secara keseluruhan. Sementara itu, jurnal (Solangi et al., 2024) menekankan

bahwa ketelitian dalam pemodelan FEM, khususnya dalam penentuan boundary condition dan properti material, sangat berpengaruh terhadap keandalan dan akurasi hasil analisis kekuatan memanjang kapal.

Perkembangan metode analisis untuk menilai kekuatan struktur lambung kapal tradisional seperti Pinisi kini menggabungkan pengujian eksperimental material (uji tarik/tekuk pada kayu, sambungan scarf, laminasi atau perkuatan FRP/komposit) dengan pemodelan numerik skala penuh menggunakan elemen hingga (FEM) untuk menangkap perilaku lokal dan global lambung di bawah beban operasional dan kejadian ekstrem (peluncuran, grounding, slamming), pendekatan terpadu ini memungkinkan verifikasi data mekanik material dari uji laboratorium sekaligus simulasi tegangan-deformasi dan titik lemah struktur pada geometri lambung sebenarnya sehingga rekomendasi memperkuat dengan (laminasi lokal, penggantian/penopang rangka dengan baja, optimasi jarak gading) dapat diajukan tanpa mengorbankan nilai tradisional konstruksi (Nowak et al., 2021; Zamarin et al., 2025; Zhang et al., 2021). Kayu sebagai material lambung kapal Pinisi memiliki sifat anisotropik, di mana kekuatan tarik sejajar serat jauh lebih tinggi dibandingkan tegak lurus serat perilaku tegangan–regangannya diawali fase elastis linier lalu beralih ke non-linier hingga titik patah, dan karakteristik ini penting diketahui melalui uji laboratorium karena menjadi dasar input analisis numerik untuk memprediksi deformasi serta potensi Kegagalan struktur (Jiang et al., 2022; Nogueira et al., 2024). Adapun penelitian yang ditulis oleh (Akbar & Admi Aksa, 2016) dengan meninjau kekuatan sambungan struktur kapal bagan siapiapi dengan variasi material kayu keruing dan meranti dengan menggunakan FEA dengan hasil pengujian menunjukkan sambunngan lurus material kayu keruing direkomendasikan untuk pembuatan kapal kayu tradisional. Sedangkan pada penelitian (Aditya & Inprasetyobudi, 2020) dengan menganalisis variasi pengurangan struktur kontruksi pada kapal kayu dengan acuan tegangan $12,75 \frac{N}{mm^2}$ yang diizinkan (BKI, 1996) dari 3 dimensi pengurangan struktur kapal nilai tegangan masih jauh dibawah batas tegangan izin.

Tegangan (*Stress*) secara matematis dituliskan pada Persamaan 1.1 sebagai berikut ;

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Dimana, σ = tegangan (Pa), F = gaya (N), dan A = luas penampang (mm) Istilah regangan mengacu pada perubahan relative dalam dimensi atau bentuk benda yang mengalami tekukan(Sears, 1958).

Kayu merupakan material anisotropik yang umumnya dimodelkan sebagai ortotropik, dengan sifat elastis yang berbeda pada arah longitudinal, radial, dan tangensial. Oleh karena itu, perilaku mekaniknya tidak dapat dijelaskan hanya dengan satu modulus elastisitas, melainkan memerlukan bentuk Hukum Hooke anisotropik tiga dimensi yang melibatkan beberapa konstanta elastis, termasuk modulus Young arah tertentu, modulus geser, dan rasio Poisson. Formulasi elastis ortotropik ini banyak digunakan untuk memodelkan perilaku elastis kayu yang bergantung pada arah serat. Bentuk umum persamaan Hukum Hooke anisotropik 3D dalam bentuk matriks

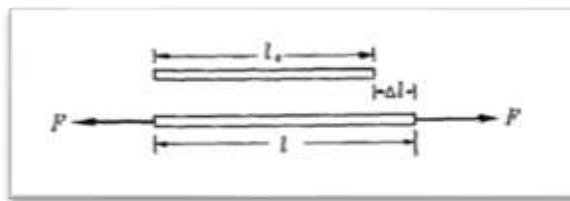
compliance ditunjukkan pada Persamaan 1.2 untuk material kayu yang memiliki tiga arah serat utama, yaitu x sebagai arah longitudinal, y sebagai arah radial, dan z sebagai arah tangensial, hubungan antara regangan dan tegangan dinyatakan menggunakan matriks compliance (Chakkour & Perré, 2024; Mascia & Lahr, 2006).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{V_{yz}}{E_y} & -\frac{V_{zz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_y} & -\frac{V_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{zz}}{E_z} & -\frac{V_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Sedangkan Rumus Tegangan (*Stress*) Dalam teori elastisitas, Hukum Hooke menyatakan bahwa tegangan (*Stress*) yang timbul akibat gaya eksternal berbanding lurus dengan regangan (*strain*) selama material masih berada dalam batas elastisnya. Hubungan ini dinyatakan secara matematis persamaan 1.3 sebagai Berikut (One et al., 2026) :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (1.3)$$

Dimana, σ = tegangan, ε = Regangan dan E = modulus elastisitas (Young's modulus), sifat material yang menunjukkan kekakuannya dalam menahan deformasi elastis, Sedangkan pada gambar 1.4 dijelaskan sebuah benda yang mengalami proses regangan (Sears, 1958).



Gambar 1. 3 Regangan Longitudinal

Dengan Persamaan 1.4 Regangan (*strain*) sebagai berikut ;

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.4)$$

Dimana, ε = Regangan, Δl = Pertambahan Panjang (mm), l_0 = Panjang awal (mm)

Dalam mekanika bahan, pada bab awal buku *mechanis of material* edisi ke 10 yang ditulis oleh (Hibbeler, 2017) Hukum Hooke tidak hanya berlaku pada tegangan dan regangan normal (Tarik/Tekuk), tetapi juga untuk tegangan-regangan geser. Tegangan

geser (τ) didefinisikan seperti pada persamaan 1.1 dengan F adalah gaya geser dan A adalah luas bidang geser, sedangkan pada regangan geser (γ) sebagai berikut;

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad (1.5)$$

Dimana dengan Δx adalah deformasi lateral dan h adalah jarak antara bidang geser. Dengan rumus sebagai berikut;

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (1.6)$$

Dimana, τ = Tegangan geser (MPa), γ = regangan geser, G = modulus geser (*shear modulus*) (MPa/GPa)

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Kekuatan balok penegar pada kapal tradisional pinisi dengan metode eksperimen dan pendekatan numerik berbasis FEM. Penelitian ini diharapkan dapat menjembatani kesenjangan dalam literatur dengan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai distribusi tegangan dan perilaku deformasi yang timbul akibat interaksi geometris pada kapal tradisional pinisi. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi pengujian eksperimen dan pemodelan numerik untuk mengevaluasi kekuatan balok penegar kapal tradisional Pinisi berbasis kayu lokal, sehingga menghasilkan data mekanik aktual dan model FEM terverifikasi yang belum banyak dilaporkan dalam literatur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan desain kapal tradisional pinisi yang lebih aman dan efisien dari segi penggunaan material, sesuai dengan standar klasifikasi modern, serta menjadi referensi bagi studi struktur lanjutan di industri perkapalan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan balok penegar pada kapal tradisional pinisi dengan metode eksperimen dan numerik

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Analisa Kekuatan Balok penegar dengan menggunakan eksperimen Uji Tarik dan analisis numerik FEM
2. Hanya melakukan eksperimen Uji Tarik
3. Tidak mempertimbangkan kondisi kayu seperti kadar Air, dan umur kayu
4. Hanya menganalisis balok penegar dan material kayu besi kapal pinisi
5. Balok Penegar yang dimaksud adalah penegar lambung (Gading Kapal)
6. Objek yang dianalisis yaitu, penegar sisi, penegar deck dan penegar dasar
7. Standar Uji Tarik menggunakan Standar (SNI 03-3399, 1994)

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan balok penegar geladak kulit dan dasar pada kapal pinisi dengan menggunakan metode

eksperimen dan numerik. Sedangkan manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah :

1. Manfaat Praktis
Memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan bagi Perusahaan-perusahaan galangan kapal tradisional phinisi dalam proses design struktur kapal
2. Manfaat Teoritis
Sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya khususnya bidang ilmu Analisa struktur dan konstruksi kapal phinisi

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Rencana Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yaitu dengan melakukan investigasi nilai dengan eksperimen dan pengaruh kekuatan struktur memanjang kapal tradisional phinisi.

2.2 Tempat dan Waktu

Adapun Tempat dan waktu pada penelitian dilakukan Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar dan Departemen Teknik mesin dilakukan mulai bulan Maret 2025 hingga selesai

2.3 Bahan Dan Alat

Adapun beberapa bahan dan alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Komputer / Laptop

Komputer digunakan sebagai alat utama dalam penelitian ini yang berfungsi selain untuk membuat laporan juga sebagai media untuk menjalankan program software yang dipakai dalam menggambar model dan menganalisis data penelitian.

2. Mesin UTM (*Universal Testing Machine*)

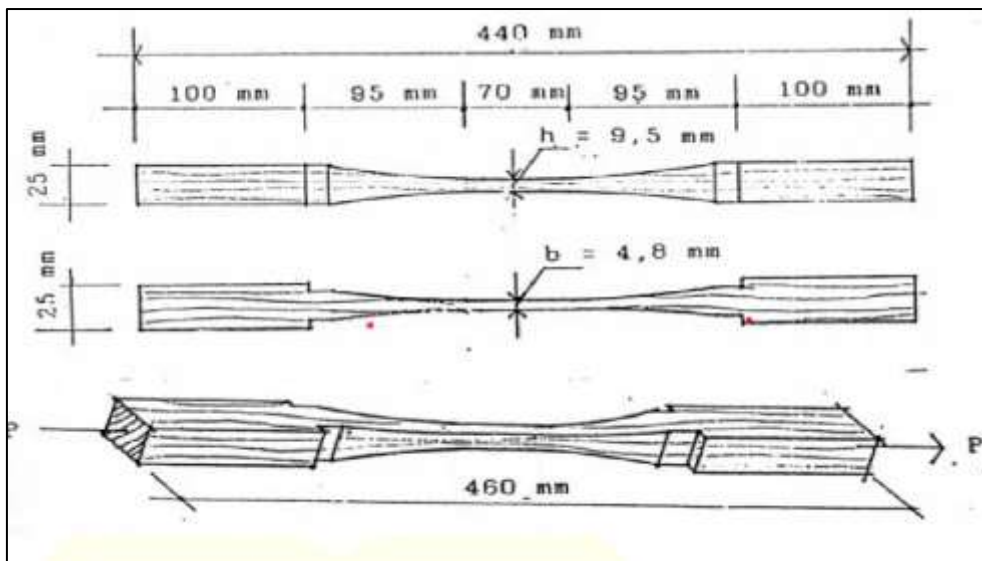
Mesin UTM merupakan rangkaian dari mesin Uji Kuat Tarik dengan ketentuan standar aturan spesimen (SNI 03-3399, 1994), sedangkan untuk spesimen Uji tekuk dengan standar aturan spesimen (ISO 13061-4, 2014) Mesin ini dilengkapi dengan sistem komputerisasi yang baik seperti pada gambar 2.1.



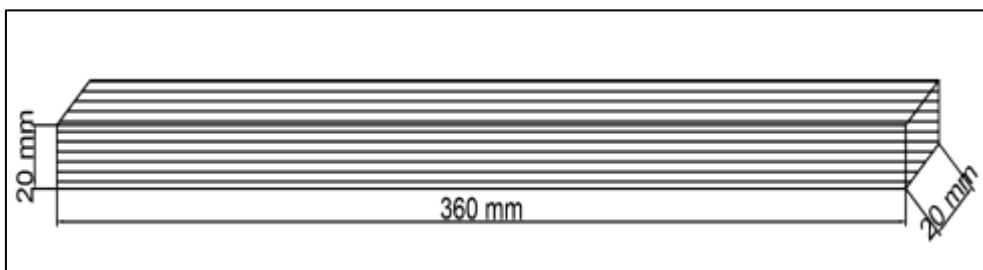
Gambar 2. 1 Mesin UTM (*Universal Testing Machine*)

3. Material Uji

Bahan material uji menggunakan kayu besi dengan ukuran dan bentuk Uji Kuat Tarik dengan Panjang spesimen uji sebesar 460 mm dengan area batas patah 70 mm dapat dilihat pada ketentuan (SNI 03-3399, 1994) Seperti gambar 2.2 sedangkan pada uji tekuk dengan dimensi spesimen Panjang 360 mm, lebar 20 mm dan tinggi 20 mm dapat dilihat pada (ISO 13061-4, 2014) seperti gambar 2.3



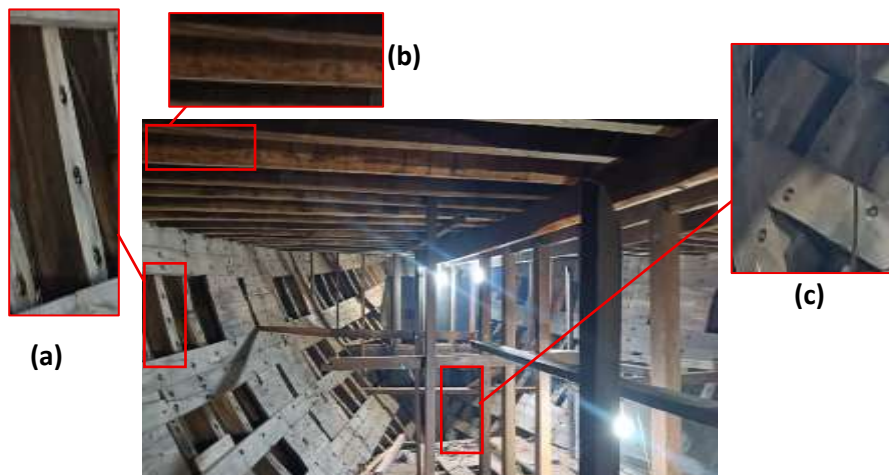
Gambar 2. 2 Ukuran Spesimen Uji tarik



Gambar 2. 3 Ukuran Spesimen Uji Tekuk

4. Objek Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan studi kasus kapal KLM Phinisi dengan ukuran utama kapal seperti yang dijelaskan pada tabel 1. Sedangkan pada gambar 2.4 merupakan sampel uji pada penelitian ini yaitu balok penegar pada bagian penegar sisi, penegar dek dan penegar bottom dengan dimensi ukuran seperti pada standar spesimen yang di gunakan. Balok penegar yang dimaksud adalah balok penegar lambung kapal dapat dilihat pada gambar struktur penampang kapal phinisi sebagai berikut:



Sumber: Survey Lapangan

Gambar 2. 4 Gambar struktur penampang (a.Penegar sisi, b.penegar dek dan c.penegar dasar)

Pada gambar 2.4 merupakan gambar struktur penampang kapal pinisi yang diambil pada saat survey lapangan, objek yang dianalisis seperti pada keterangan diatas bahwa simbol a penegar sisi, simbol b penegar dek dan simbol c penegar dasar

5. Membuat spesimen

Dari gambar 2.4 pada penampang struktur kapal pinisi dilakukan pembuatan 6 spesimen uji Tarik dan 6 spesimen uji tekuk, pada bagian gading sisi, gading bottom dan gading dek seperti pada gambar 2.5 dan 2.6 dokumentasi hasil eksperimen sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Dokumentasi hasil pegujian spesimen uji tarik



Gambar 2. 6 Dokumentasi hasil pegujian spesimen uji tekuk

6. *Software SpaceClaim*

Software tersebut bawaan dari *ANSYS* workbench digunakan untuk membuat model geometry benda uji sesuai dengan standar spesimen Seperti pada gambar 2.8 dan 2.9 Setelah dilakukan pemodelan pada *SpaceClaim* kemudian model di ekspor ke *Software ANSYS Explicit Dynamic* dan memasukkan spesifikasi material kayu besi.

7. *Software ANSYS Workbench*

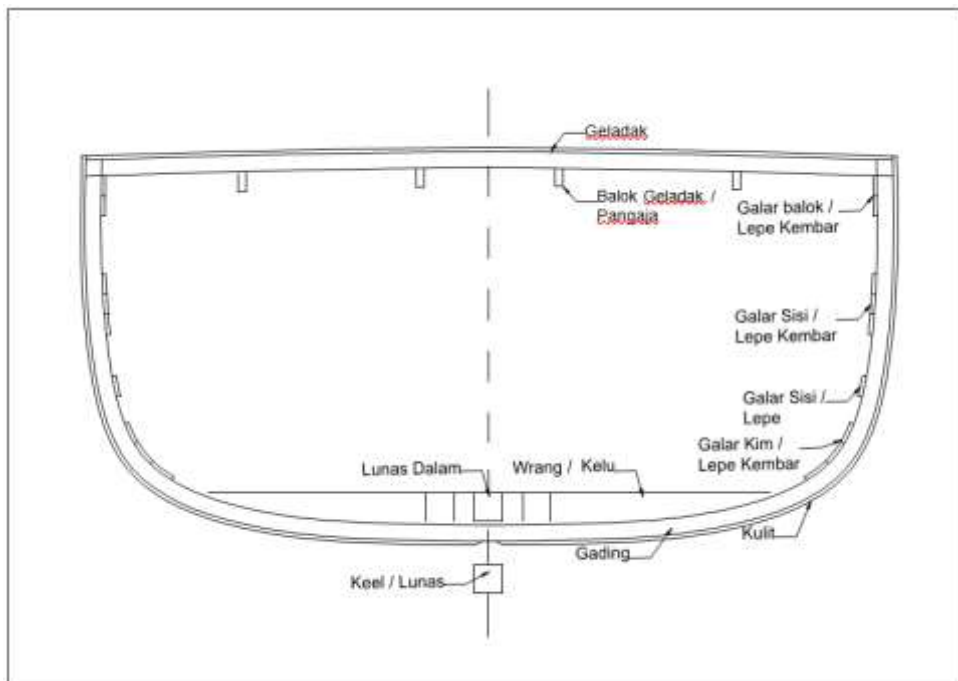
Software ANSYS Workbench mengadopsi metode elemen hingga (FEM) dan menganalisis data dengan menggunakan metode eksperimen numerik. Data spesifikasi material, Kemudian data ordinat dimasukkan pada *Software ANSYS Explicit Dynamic* untuk selanjutnya dilakukan analisis data.

2.4 Metode Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan pada penelitian ini antara lain:

2.4.1 Pengumpulan Data

Penelitian diawali dengan mengumpulkan data dengan studi literatur serta mencari referensi yang relevan dengan penelitian kapal tradisional phinisi dengan studi kasus KLM Phinisi dengan ukuran utama seperti pada tabel 1 dan gambar 2.7 penampang *midship* kapal phinisi. Sedangkan objek penelitian berfokus pada penampang gading kapal phinisi seperti yang dijelaskan pada gambar 2.4. hanya berfokus pada sampel *side frame*, *bottom frame* dan *deck frame*. Sedangkan pada gambar 2.7 merupakan tampak depan gambar penampang kapal phinisi yang menjadi objek penelitian ini.



Gambar 2. 7 Gambar Penampang Midship

Tabel 1 Dimensi Ukuran Utama Kapal

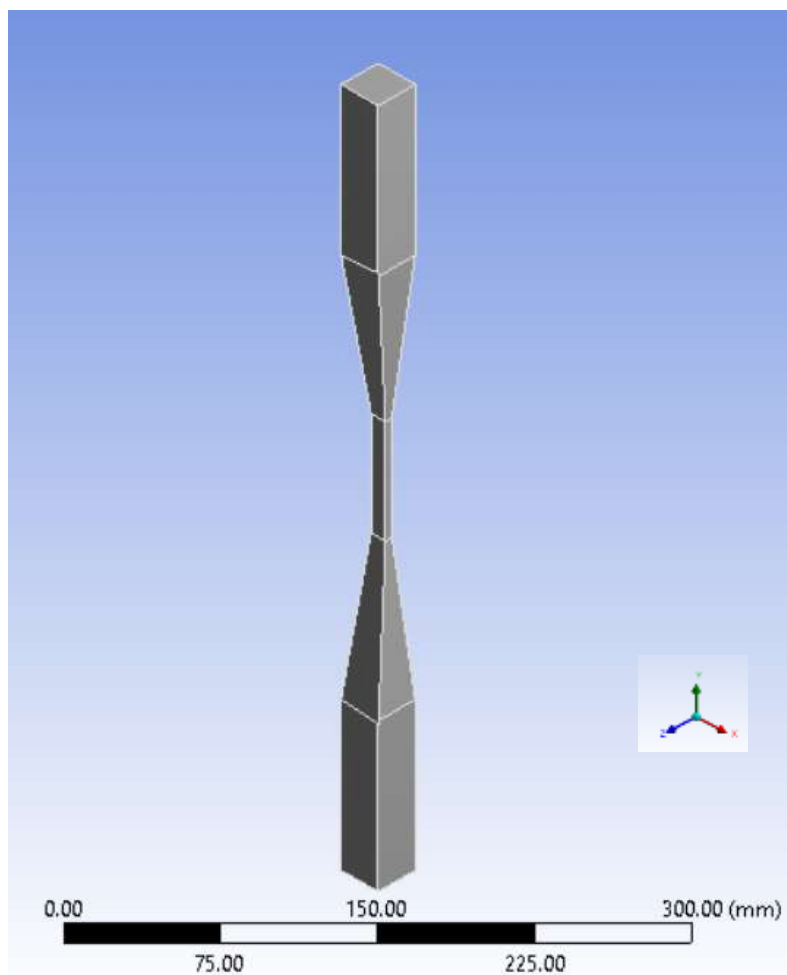
Data Kapal		
Item	Ukuran	Unit
<i>Length Over All (LOA)</i>	52,32	m
<i>Length of Deck (LOD)</i>	39,23	m
<i>Length Between Perpendicular (LBP)</i>	30,99	m
<i>Breath</i>	10,37	m
<i>Deck Breath</i>	9,85	m
<i>Depth Moulded</i>	5,07	m
<i>Draft Design</i>	3,00	m

Selain ukuran utama kapal, data spesifikasi material kayu besi digunakan pada struktur kapal phinisi menjadi faktor penting dalam analisis kekuatan. Adapun spesifikasi material kayu besi seperti pada tabel 2 sebagai berikut:

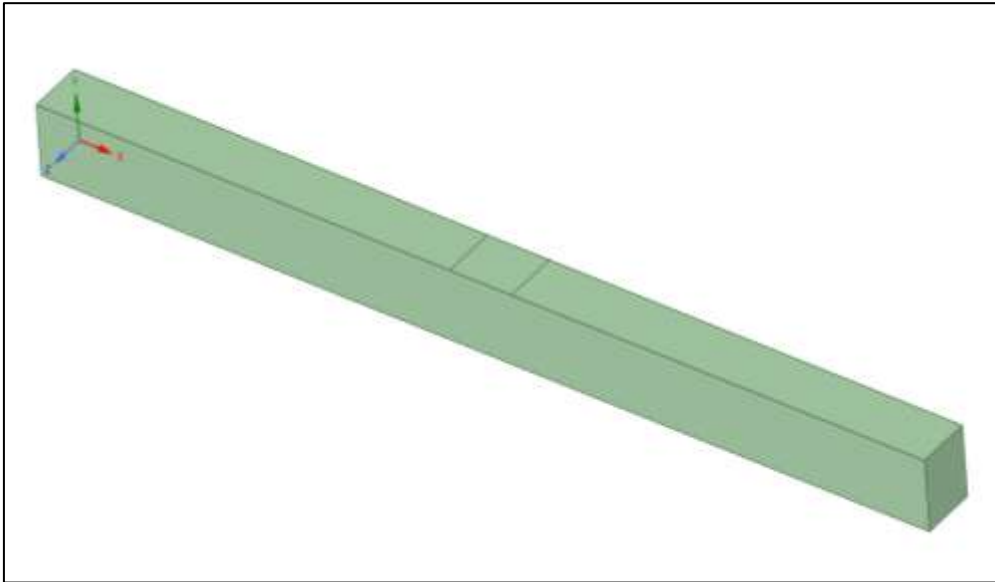
Tabel 2 Spesifikasi material Kayu Besi

Data Material Kayu Besi		
Item	Ukuran	Unit
<i>Modulus Young (E)</i>	18000	MPa
<i>Poisson Ratio</i>	0,3	
<i>Density (ρ)</i>	1100	kg/m ³
<i>Yield Strength (σ_y)</i>	54,53	MPa
<i>Tangent Modulus</i>	1800	MPa

Material yang digunakan pada konstruksi kapal phinisi tersebut yakni material kayu besi yang memiliki sifat anisotropik, yang memiliki sifat mekanik sebesar 54,53 MPa dan modulus elastisitas sebesar 18000 MPa, sehingga mampu menahan beban statik maupun beban dinamis yang terjadi pada lambung kapal phinisi. Nilai *poisson ratio* sebesar 0,3 menunjukkan sifat elastisitas material dalam menahan deformasi lateral. Ketika mengalami tegangan aksial, sedangkan tangent modulus 10% dari *Young Modulus* yaitu sebesar 1800 MPa digunakan untuk memperkirakan batas non-linieritas material pada kondisi mendekati tegangan maksimum atau modulus tersebut digunakan untuk mendefinisikan material setelah melewati kuat luluh pada daerah plastik. Selanjutnya data tersebut digunakan dalam analisis numerik yang menggunakan software *ANSYS Explicit Dynamic*. Adapun model 3D penampang spesimen uji Tarik dan uji tekuk yang didesain di *SpaceClaim* dengan ukuran dimensi yang sesuai acuan standar yang digunakan seperti terlihat pada gambar 2.8 dan gambar 2.9



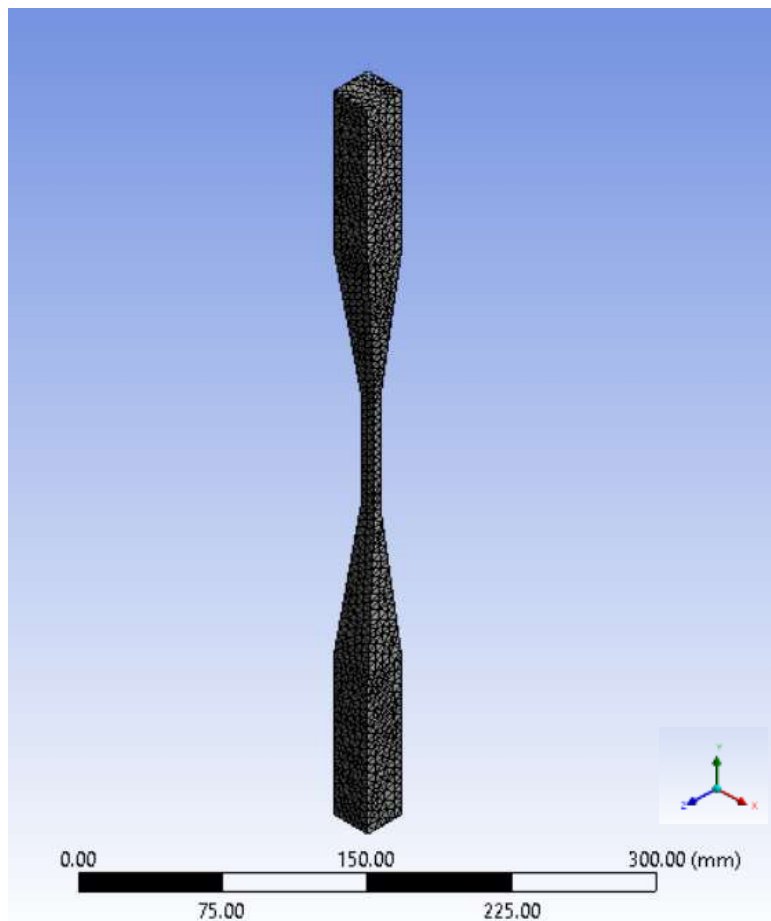
Gambar 2. 8 Model Geometri 3D Spesimen Uji Tarik



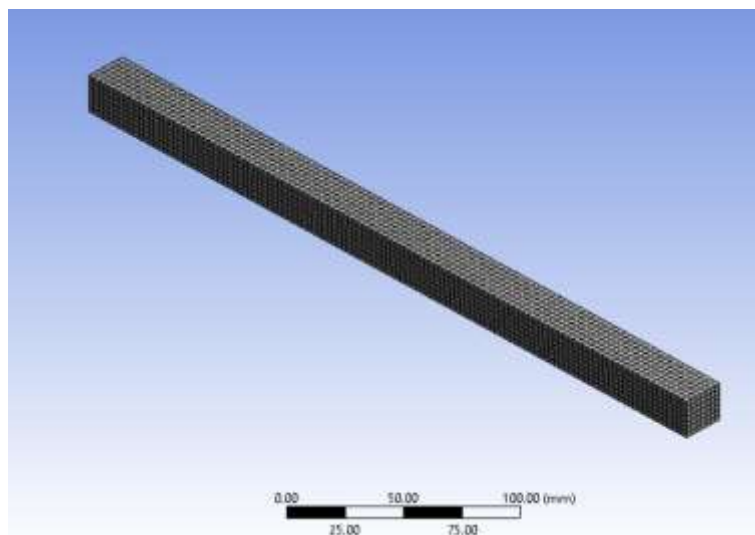
Gambar 2. 9 Model Geometri 3D Spesimen Uji Tekuk

2.4.2 Pemodelan 3D dan Penerapan Meshing

Model geometri yang telah dibuat menggunakan perangkat lunak *SpaceClaim* selanjutnya diimpor ke dalam *ANSYS Workbench* untuk dilakukan pemodelan tiga dimensi dan analisis kekuatan penampang balok. Pada tahap awal, dilakukan pendefinisian material berdasarkan hasil pengujian laboratorium, meliputi modulus elastisitas, rasio Poisson, dan sifat kekuatan material, sehingga perilaku material dalam simulasi numerik dapat merepresentasikan kondisi aktual. Pemodelan numerik dilakukan menggunakan modul *Explicit Dynamic* pada *ANSYS Workbench*, yang dipilih karena kemampuannya dalam menganalisis respons struktur terhadap pembebanan dinamis dan nonlinier, termasuk deformasi besar dan perilaku material hingga mendekati Kegagalan. Selanjutnya, proses meshing diterapkan pada model tiga dimensi dengan ukuran elemen sebesar 3 mm. Ukuran mesh ini dipilih sebagai kompromi antara tingkat ketelitian hasil analisis dan efisiensi waktu komputasi. Jenis elemen yang digunakan adalah elemen solid tiga dimensi, yang memungkinkan distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok dapat dimodelkan secara detail. Mesh dengan ukuran 5 mm diterapkan secara merata pada seluruh model, dengan perhatian khusus pada daerah yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Penerapan meshing yang sesuai ini bertujuan untuk memperoleh hasil simulasi yang stabil dan akurat dalam mengevaluasi kekuatan penampang balok menggunakan pendekatan *Finite Element Method* berbasis *Explicit Dynamic* seperti pada gambar 2.10. dan gambar 2.11.



Gambar 2. 10 Ukuran Meshing 5 Mm Pada Model Spesimen Uji Tarik

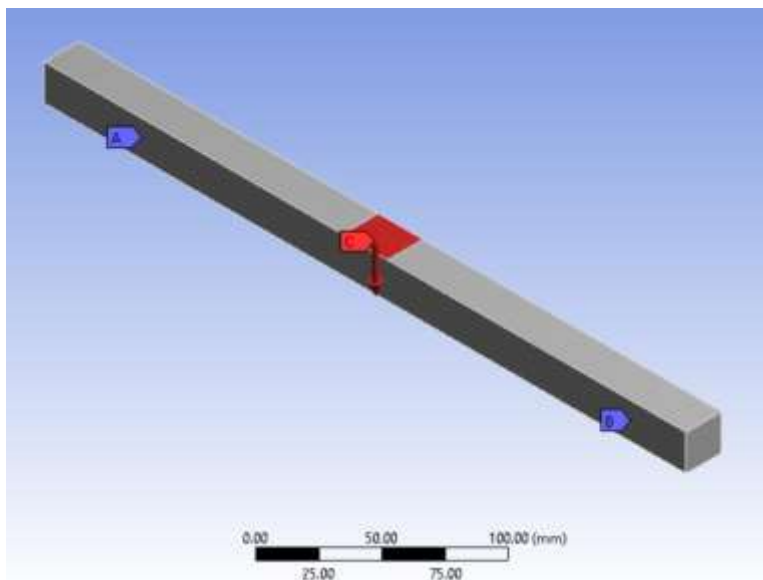


Gambar 2. 11 Ukuran Meshing 5 Mm Pada Model Spesimen Uji Tekuk

Kualitas mesh dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu *skewness*, *aspect ratio*, dan *orthogonal quality*. Nilai *skewness* dijaga berada di bawah batas yang direkomendasikan, sedangkan faktor rasio dijaga mendekati satu untuk menghindari perubahan bentuk pada elemen. Selain itu, nilai *orthogonal quality* dipertahankan di atas nilai minimum yang disarankan oleh ANSYS untuk memastikan stabilitas numerik selama simulasi *Explicit Dynamic*. Untuk menjamin keandalan hasil, dilakukan pemeriksaan konvergensi dengan membandingkan hasil tegangan dan deformasi pada ukuran mesh yang berbeda, dan ukuran mesh 5 mm dipilih karena memberikan perubahan hasil yang relatif kecil dibandingkan dengan mesh yang lebih halus. Dengan demikian, mesh yang digunakan dianggap telah memenuhi kriteria konvergensi dan kualitas yang memadai untuk analisis kekuatan penampang balok.

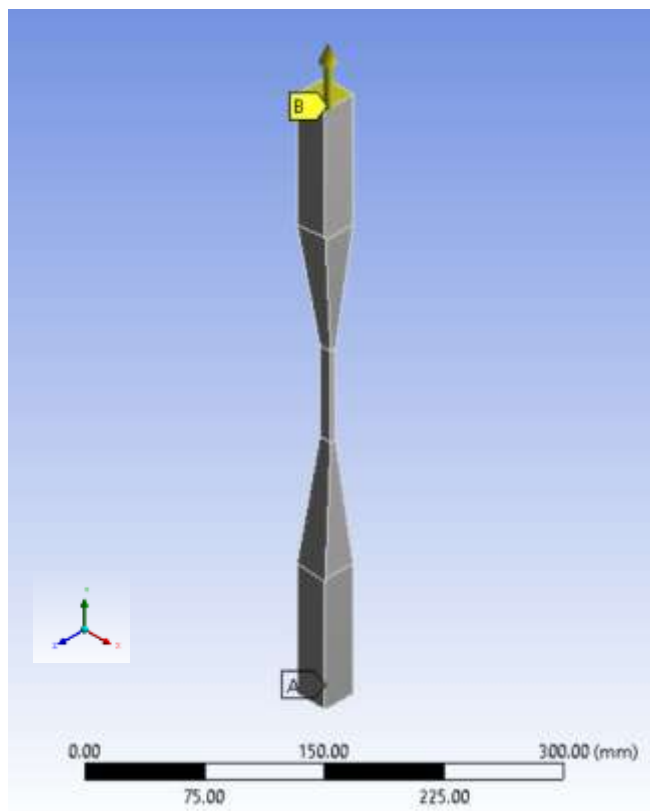
2.4.3 Pembebanan dan pemusatan

Setelah proses meshing diterapkan pada model, tahap selanjutnya adalah pendefinisian kondisi batas (*boundary conditions*) berupa pemusatan dan pemberian beban pada model. Pemusatan dilakukan untuk merepresentasikan kondisi tumpuan aktual pada struktur balok sehingga pergerakan tertentu dapat dibatasi sesuai dengan kondisi nyata. Penentuan pemusatan yang tepat sangat penting untuk memastikan respons struktur yang dihasilkan dari analisis numerik sesuai dengan perilaku struktur sebenarnya. Pemberian beban pada model dilakukan sesuai dengan skenario pembebanan yang telah ditentukan, baik berupa beban statis maupun beban dinamis, tergantung pada kondisi analisis yang dilakukan. Beban diterapkan secara terkontrol pada area tertentu dari model untuk mensimulasikan pengaruh gaya kerja terhadap penampang balok. Kombinasi pemusatan dan pembebanan yang tepat memungkinkan distribusi tegangan dan deformasi yang dihasilkan dari analisis *Finite Element Method* dapat dievaluasi secara akurat seperti yang dijelaskan pada gambar 2.12. dan 2.13



Gambar 2. 12 Pembebanan pada model spesimen uji Tekuk

Model spesimen uji tekuk disusun untuk merepresentasikan kondisi pembebanan yang terjadi pada elemen struktur kapal, khususnya balok penegar. Pada pengujian ini, gaya tekuk diberikan searah sumbu Y, sesuai dengan arah pembebanan utama yang bekerja pada spesimen selama pengujian. Metode pembebanan yang digunakan adalah *three point loading*, di mana spesimen ditumpu pada dua titik tumpuan di bagian bawah dan diberikan beban terpusat pada bagian tengah bentang. Dua titik tumpuan berfungsi sebagai penahan perpindahan vertikal spesimen, sementara beban tekuk terpusat diberikan pada satu titik di tengah spesimen untuk menghasilkan respons lentur dan tekuk secara bersamaan. Konfigurasi ini dipilih karena mampu menghasilkan distribusi tegangan yang representatif terhadap kondisi kerja balok penegar pada struktur kapal. Model pembebanan dan pemusatan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.12, yang menggambarkan arah gaya, posisi titik tumpuan, serta lokasi pembebanan pada spesimen uji. Dengan penerapan metode *three point loading*, distribusi tegangan maksimum diharapkan terjadi pada bagian tengah spesimen, sehingga perilaku deformasi, konsentrasi tegangan, serta potensi Kegagalan material dapat diamati secara jelas. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kekuatan tekuk dan karakteristik mekanik spesimen secara efektif, baik pada pengujian eksperimental maupun pada pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga.



Gambar 2. 13 Pembebanan pada model spesimen uji Tarik

Dari gambar 2.13 diimana titik B merupakan titik constrain atau titik jepit sedangkan pada titik A merupakan titik pemberian gaya/ beban sesuai dengan arah sumbu x sedangkan pada

2.4.4 Simulasi Model

Simulasi model numerik dilakukan untuk merepresentasikan kondisi pengujian tekuk pada spesimen secara virtual menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Model geometri spesimen disusun sesuai dengan dimensi aktual hasil pengujian eksperimental dan kemudian diimpor ke dalam *ANSYS Workbench*. Pendefinisian material dilakukan berdasarkan hasil uji laboratorium, sehingga sifat mekanik yang digunakan dalam simulasi mencerminkan perilaku material yang sebenarnya. Simulasi dilakukan menggunakan modul *Explicit Dynamic* untuk menangkap respons nonlinier material dan deformasi yang terjadi selama proses pembebanan. Kondisi batas diterapkan dengan metode three-point loading, di mana dua titik tumpuan ditempatkan pada bagian bawah spesimen sebagai penahan perpindahan vertikal, sedangkan beban tekuk diberikan secara terpusat pada bagian tengah spesimen dengan arah gaya searah sumbu Y. Konfigurasi ini disesuaikan dengan skema pengujian eksperimental agar hasil simulasi dapat dibandingkan secara langsung. Model kemudian dimasukkan ke tahap meshing dengan ukuran elemen 3 mm, yang telah memenuhi kriteria kualitas mesh dan konvergensi. Selama simulasi, parameter keluaran yang diamati meliputi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi spesimen. Hasil simulasi numerik selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur, mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan, serta memvalidasi hasil pengujian eksperimental sebagai bagian dari metodologi penelitian.

2.4.5 Perhitungan Persentasi Kegagalan

Setelah simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga (FEM) dilakukan, hasil yang diperoleh berupa nilai tegangan, deformasi, dan kapasitas beban maksimum pada spesimen uji. Hasil simulasi ini selanjutnya dibandingkan dengan data hasil pengujian eksperimen untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara model numerik dan kondisi aktual. Perbandingan dilakukan dengan menghitung persentasi kesalahan antara nilai hasil eksperimen dan hasil simulasi numerik. Perhitungan persentasi kesalahan digunakan sebagai parameter validasi model FEM, di mana nilai kesalahan yang relatif kecil menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan hasil eksperimen. Selisih yang terjadi antara kedua metode dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti asumsi homogenitas material pada pemodelan numerik, penyederhanaan geometri, serta ketidakpastian kondisi batas dan pembebanan pada pengujian eksperimen. Secara umum, hasil perbandingan menunjukkan bahwa simulasi FEM mampu merepresentasikan perilaku mekanik spesimen dengan cukup baik. Distribusi tegangan dan pola deformasi yang dihasilkan dari simulasi numerik menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan hasil pengujian eksperimen. Dengan demikian, model FEM yang digunakan dapat dinyatakan valid dan dapat dijadikan sebagai alat

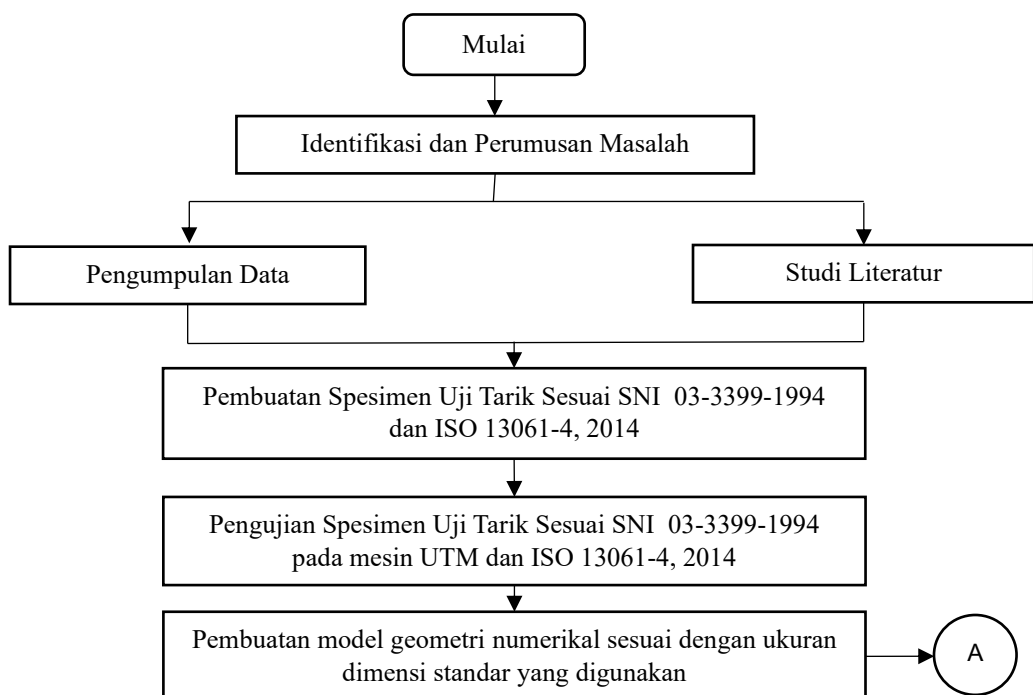
prediksi untuk menganalisis kekuatan struktur balok pada kondisi pembebanan yang serupa berikut indikator Persentasi Kegagalan.

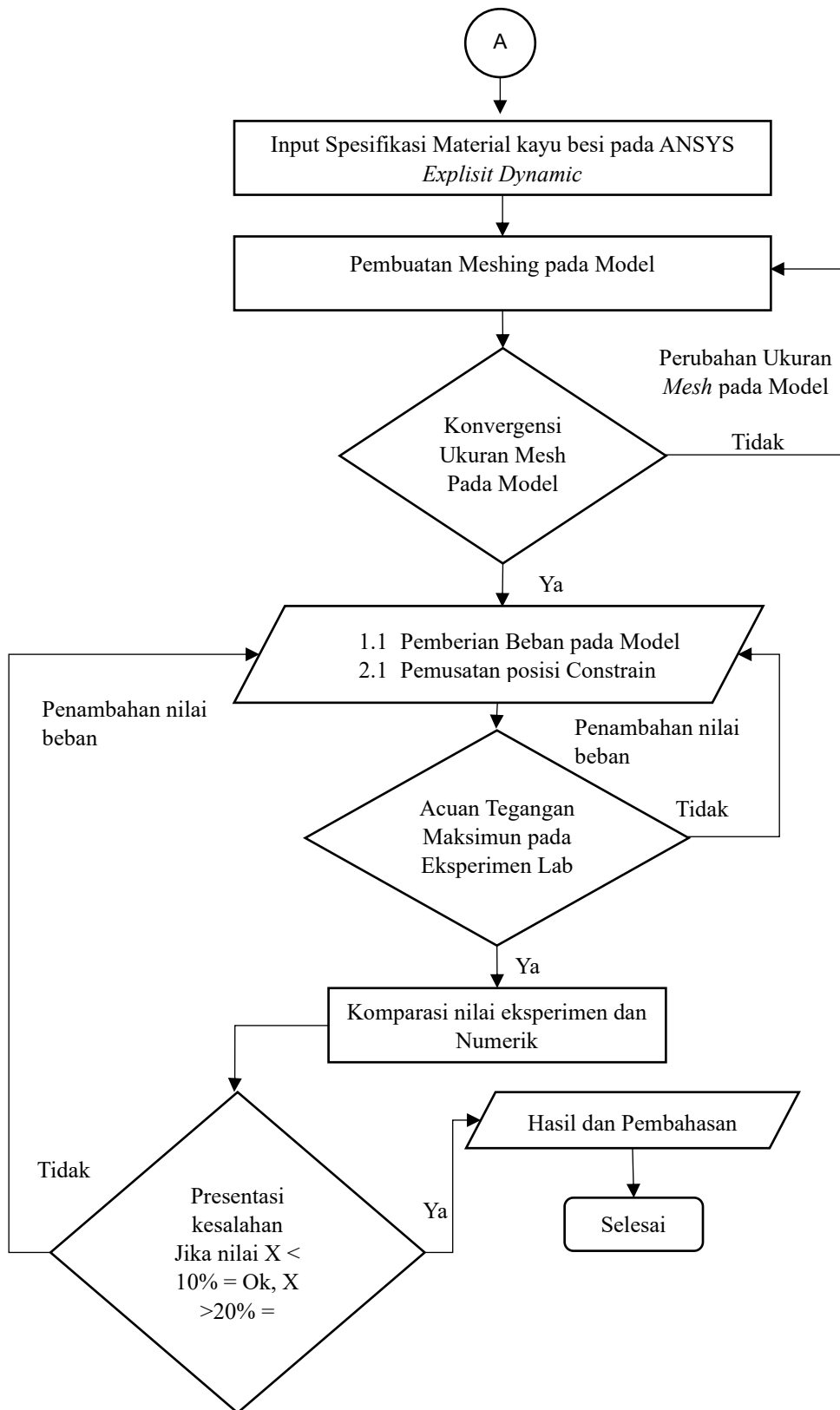
Tabel 3 Persentasi Kegagalan	
Kegagalan (%)	Keterangan
< 10%	Baik Sekali
10–15%	Baik
15–20%	Cukup
> 20%	Perlu Koreksi

Seperti yang dijelaskan pada tabel Persentasi kegagalan jika nilai perbandingan eksperimen lab dan eksperimen numerik sebesar kurang dari 10% maka hasil di dapatkan Baik sekali atau menandakan hasil eksperimen numerik mendekati hasil nyata eksperimen lab, jika nilai antara 10 sampai 15 % maka hasil perbandingan eksperimen lab dan numerik Baik, jika nilai yang didapatkan antara 15 sampai 20% maka hasil perbandingan eksperimen lab dan numerik Cukup, tetapi jika nilai yang didapatkan lebih dari 20% maka hasil perbandingan numerik dan eksperimen lab harus di Koreksi dengan kata lain penambahan pembebanan atau perubahan ukuran meshing pada model geometri *ANSYS* sebelum dilakukan *Running*.

2.5 Kerangka Penelitian

Pada kerangka penelitian menjelaskan bagaimana proses penelitian dengan rincian materi dan urutan alur penelitian dibuat secara sistematis. Sehingga dapat menjadi pedoman dalam pemecahan masalah yang akan dihadapi dalam menganalisis data dengan menggunakan alat bantu software *ANSYS* sehingga memudahkan untuk menganalisis data. Berikut alur kerangka penelitian.





Gambar 2. 14 Diagram Alir

