

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur pelat merupakan komponen struktural tipis yang banyak digunakan dalam berbagai bidang teknik, termasuk teknik kelautan, yang bekerja terutama di bawah beban lentur dan beban bidang. Dalam konteks struktur kapal, elemen pelat membentuk bagian utama konstruksi seperti geladak, lambung, alas, dan sekat, yang harus mampu menahan beban hidrostatik, beban gelombang, serta beban operasional selama masa layan kapal. Secara geometris, pelat memiliki ketebalan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan dimensi panjang dan lebarnya, sehingga perilaku mekaniknya sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, geometri, serta detail sambungan yang digunakan (Lima et al., 2020).

Perkembangan teknologi dan desain struktur menuntut perencanaan elemen struktur yang tidak hanya memenuhi aspek kekuatan, tetapi juga efisiensi dan keselamatan terhadap berbagai kondisi pembebanan. Pada struktur kapal, salah satu tantangan utama dalam perancangan struktur pelat adalah terjadinya konsentrasi tegangan pada daerah sambungan, pertemuan antar elemen struktur, serta daerah sudut akibat perubahan geometri yang tajam. Konsentrasi tegangan ini dapat memicu terjadinya deformasi berlebih, retak awal, hingga kegagalan lokal yang berpotensi memengaruhi kinerja struktur secara keseluruhan (Ibrahim et al., 2015).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai elemen perkuatan lokal dikembangkan dan diterapkan dalam desain struktur kapal. Di antara elemen perkuatan yang umum digunakan adalah pelat ikutan (*attached plate*) dan elemen *hard corner*. Pelat ikutan berfungsi untuk meningkatkan kekakuan lokal dan memperluas area distribusi beban pada pelat utama, sedangkan *hard corner* digunakan untuk memperhalus aliran gaya pada daerah sudut struktur sehingga konsentrasi tegangan dapat dikurangi. Penggunaan elemen perkuatan ini diharapkan mampu meningkatkan kekuatan struktur serta memperpanjang umur layan kapal (McKenzie, 2020).

Namun demikian, efektivitas pelat ikutan dan elemen *hard corner* sangat dipengaruhi oleh konfigurasi geometrinya, khususnya dimensi lebar elemen tersebut. Konfigurasi yang kurang tepat dapat menyebabkan peningkatan tegangan lokal yang signifikan pada daerah tertentu. Tegangan lokal yang berlebihan berpotensi menimbulkan deformasi berlebih, inisiasi retak, hingga kegagalan struktur, terutama pada struktur kapal yang bekerja dalam kondisi pembebanan dinamis dan siklik. Oleh karena itu, penentuan dimensi pelat ikutan dan *hard corner* menjadi aspek penting dalam perancangan struktur kapal yang andal dan aman (Peterson, 1974).

Perbesaran lebar pelat ikutan dan elemen *hard corner* sering diterapkan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan kapasitas struktur dan memperbaiki perilaku distribusi tegangan. Secara teoritis, perbesaran lebar elemen perkuatan akan meningkatkan kekakuan lokal dan memengaruhi jalur aliran gaya pada struktur. Namun, perubahan dimensi tersebut tidak hanya berdampak pada peningkatan kekuatan, tetapi juga memengaruhi distribusi gaya, pola deformasi, serta efisiensi penggunaan material. Perbesaran yang berlebihan berpotensi menghasilkan desain yang tidak efisien dan

bahkan menimbulkan permasalahan struktural baru (Paik & Thayamballi, 2003; Zienkiewicz & Taylor, 2000).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perilaku struktural pelat kapal sangat sensitif terhadap kondisi geometris dan karakteristik lokal struktur. Perubahan konfigurasi elemen pelat dan perkuatannya dapat menyebabkan perbedaan yang signifikan pada distribusi tegangan dan kekuatan struktur. Hal ini menegaskan bahwa elemen perkuatan lokal memiliki peran penting dalam menentukan kinerja struktur pelat kapal, namun juga perlu dianalisis secara cermat untuk memastikan efektivitasnya (He et al., 2020).

Meskipun kajian mengenai kekuatan *ultimate* pelat dan struktur pelat berpenegar telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus membahas pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan elemen *hard corner* terhadap respons struktur pelat kapal masih relatif terbatas. Terutama, masih diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai konfigurasi perbesaran lebar yang paling optimal ditinjau dari aspek kekuatan, kekakuan, dan efisiensi material.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan elemen *hard corner* terhadap perilaku struktur pelat kapal dengan menggunakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain struktur kapal yang lebih andal, efisien, serta memenuhi persyaratan keselamatan yang berlaku, sekaligus menjadi referensi dalam perancangan elemen perkuatan lokal pada struktur pelat kapal (Cook, 2002; Szilard, 1974).

Struktur pelat berpenegar (*stiffened panels*) merupakan elemen struktural utama yang digunakan secara luas pada infrastruktur sipil, industri perkapalan dan lepas pantai, khususnya pada bagian lambung kapal, geladak, dan sekat kedap air (Lima et al., 2020).

1.2 Teori Dasar

1.2.1 Sejarah Kapal *Bulk Carrier*

Sejarah perkembangan kapal *bulk carrier* bermula dari kebutuhan manusia untuk mengangkut sumber daya alam dalam jumlah besar antar wilayah akibat perbedaan ketersediaan sumber daya di berbagai daerah. Awalnya, muatan curah diangkut menggunakan kapal kargo konvensional yang kurang efisien karena memerlukan pengemasan dan penataan khusus. Seiring meningkatnya perdagangan global dan perkembangan teknologi perkapalan, muncul desain kapal khusus yang mampu mengangkut muatan curah tanpa kemasan, yaitu *bulk carrier*. Kapal ini terus berkembang dengan struktur modern seperti *double bottom*, *hopper tank*, dan *topside tank* yang meningkatkan kekuatan dan efisiensi ruang muat. Dalam perkembangannya, *bulk carrier* menjadi tulang punggung distribusi komoditas global karena mampu mengangkut muatan besar secara ekonomis, terutama bagi negara penghasil sumber daya seperti Indonesia. Namun demikian, kapal ini juga menghadapi tantangan keselamatan, seperti risiko pergeseran muatan dan *liquefaction* yang dapat mengganggu stabilitas kapal. Oleh karena itu, desain *bulk carrier* modern seperti yang terlihat pada Gambar 1 tidak hanya berfokus pada kapasitas dan efisiensi, tetapi juga pada peningkatan keselamatan sesuai standar internasional. Secara keseluruhan,

evolusi *bulk carrier* mencerminkan perkembangan teknologi dan kebutuhan industri global, sehingga kapal ini menjadi elemen penting dalam perdagangan internasional dan pertumbuhan ekonomi dunia (Antika et al., 2019).



Gambar 1 Desain Model 3D Kapal *Bulk Carrier*
(Sumber: Antika et al., 2019)

Bulk carrier merupakan kapal niaga yang dirancang khusus untuk mengangkut muatan curah dalam jumlah besar seperti semen, pupuk, dan bahan mentah lainnya. Kapal ini memiliki struktur yang efisien dengan ruang muat yang luas sehingga memungkinkan pengangkutan muatan tanpa proses penataan (*trimming*), serta didukung oleh elemen konstruksi seperti *double bottom*, *hopper tank*, dan *topside tank* yang berfungsi meningkatkan kekuatan lambung sekaligus memaksimalkan kapasitas muatan. Secara konstruksi, *bulk carrier* umumnya menggunakan sistem kombinasi, yaitu konstruksi melintang pada sisi lambung dan memanjang pada bagian *deck* dan *bottom*. Selain itu, kapal ini dirancang dengan orientasi utama untuk memaksimalkan kapasitas muatan, namun tetap mempertimbangkan batasan operasional seperti kedalaman pelabuhan dan kemudahan proses bongkar muat, sehingga menjadikannya sebagai salah satu jenis kapal dengan desain yang paling rasional dan efisien dalam transportasi laut (Ponco Bagio Pamungkas, Samuel, 2000).

Kapal *bulk carrier* umumnya terbuat dari baja konstruksi kapal (*ship building steel*) karena memiliki kekuatan tinggi, mudah dilas, serta mampu menahan beban besar dan kondisi laut yang berat. Beberapa material yang sering digunakan pada struktur kapal *bulk carrier* yaitu:

1. *Mild Steel* (MS) / Baja Lunak
 - a. Material paling umum digunakan pada pelat lambung, *deck*, dan sekat.
 - b. Memiliki sifat mudah dibentuk dan dilas.
 - c. Contoh: ASTM A36 atau baja standar klasifikasi kapal.
2. *High Tensile Steel* (HTS)
 - a. Digunakan pada area yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi namun tetap ringan.
 - b. Memiliki *yield strength* lebih besar dibanding baja biasa.
 - c. Banyak digunakan pada *deck*, *bottom*, dan area struktur utama.

3. *Marine Grade Steel*

- a. Baja khusus kapal yang tahan terhadap lingkungan laut dan korosi.
- b. Biasanya mengikuti standar klasifikasi seperti:
 - (1) Biro Klasifikasi Indonesia (BKI)
 - (2) *Det Norske Veritas* (DNV)
 - (3) *American Bureau of Shipping* (ABS)

Selain itu, dalam operasinya di laut, kapal *bulk carrier* sangat dipengaruhi oleh kondisi gelombang yang dapat memengaruhi respons gerak kapal seperti *pitch* dan *heave*. Respons ini berkaitan langsung dengan kenyamanan, keselamatan, serta kinerja struktur kapal selama beroperasi. Salah satu faktor penting yang memengaruhi respons tersebut adalah bentuk geometris haluan, khususnya sudut *bow flare*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan sudut *bow flare* mampu mereduksi respons *pitch* dan *heave* secara signifikan, baik pada kondisi *head sea* maupun *quartering sea*. Dengan berkurangnya respons gerak ini, kapal menjadi lebih stabil dan risiko terjadinya beban dinamis berlebih pada struktur dapat diminimalkan. Namun demikian, peningkatan dimensi geometris seperti sudut *bow flare* juga harus dipertimbangkan secara optimal, karena selain memberikan keuntungan dalam mereduksi respons gerak dan beban dinamis, juga dapat menyebabkan peningkatan berat struktur dan biaya konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara performa hidrodinamika, kekuatan struktur, dan efisiensi desain agar kapal *bulk carrier* dapat beroperasi secara aman, ekonomis, dan andal dalam berbagai kondisi gelombang (Setiawan et al., 2022).

Selanjutnya, dalam konteks analisis struktur, kinerja kapal *bulk carrier* juga sangat dipengaruhi oleh perilaku pelat berpenegar (*stiffened plate*) yang menjadi komponen utama dalam menahan beban. Struktur ini bekerja dengan mendistribusikan beban melalui interaksi antara pelat dan elemen penegar, sehingga konfigurasi geometris serta detail perkuatan lokal seperti pelat ikutan dan *hard corner* memiliki peran yang sangat penting. Perubahan dimensi pada elemen-elemen tersebut, seperti perbesaran lebar pelat ikutan, dapat meningkatkan kekakuan lokal dan memperbaiki aliran gaya pada struktur, namun juga berpotensi mengubah distribusi tegangan dan pola deformasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang cermat untuk memastikan bahwa modifikasi yang dilakukan benar-benar mampu menurunkan konsentrasi tegangan pada area kritis tanpa mengurangi efisiensi struktur, sehingga kinerja kapal tetap optimal dalam menghadapi beban operasional maupun kondisi lingkungan laut (Tri Wahyu et al., 2025).

1.2.2 Struktur Pelat pada Konstruksi Kapal

Struktur pelat merupakan elemen utama dalam konstruksi kapal yang membentuk bagian-bagian penting seperti geladak, lambung, alas, dan sekat. Pelat pada struktur kapal umumnya dikategorikan sebagai pelat tipis, yaitu pelat dengan ketebalan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan dimensi panjang dan lebarnya. Kondisi tersebut menyebabkan perilaku struktur pelat sangat dipengaruhi oleh beban lentur, beban bidang, serta kondisi batas pada tepi pelat (Lima et al., 2020).

Dalam struktur kapal, pelat bekerja menahan beban statis dan dinamis, seperti beban hidrostatik, beban gelombang, serta beban operasional selama masa layanan kapal. Oleh karena itu, perencanaan struktur pelat harus mempertimbangkan kekuatan, kekakuan, serta kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban secara aman. Struktur kapal merupakan struktur teknik yang sebagian besar tersusun dari pelat baja tipis yang saling terhubung membentuk sistem struktur ruang. Elemen pelat ini meliputi pelat geladak, pelat lambung (*side shell*), pelat alas (*bottom shell*), sekat memanjang dan melintang, serta struktur pendukung lainnya. Pelat-pelat tersebut bekerja secara bersama-sama dalam menahan beban hidrostatik, beban gelombang, beban muatan, dan beban operasional kapal.

Sebagai struktur pelat tipis, perilaku struktur kapal sangat dipengaruhi oleh geometri, kondisi batas, serta detail sambungan antar elemen. Perubahan kecil pada dimensi atau bentuk elemen struktural dapat menyebabkan perubahan signifikan pada distribusi tegangan dan deformasi. Oleh karena itu, perencanaan detail struktur, termasuk penggunaan pelat ikutan dan *hard corner*, menjadi aspek penting dalam desain struktur kapal yang aman dan andal. Pembangkitan listrik tenaga hibrida merupakan suatu pembangkitan dengan sistem penggabungan dari berbagai macam sumber energi seperti aliran air, energi angin, energi matahari, energi biogas, energi panas, ataupun dengan menggunakan energi fosil.

1.2.3 Perilaku Mekanik Struktur Kapal

Perilaku mekanik struktur pelat ditentukan oleh hubungan antara beban luar, geometri pelat, kondisi batas, serta sifat material. Pada kondisi elastis, hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti hukum *Hooke*, sedangkan deformasi pelat dipengaruhi oleh momen lentur dan gaya geser yang bekerja (Gere & Timoshenko, 1997).

Perubahan geometri pelat, seperti penambahan atau perbesaran dimensi elemen perkuatan, akan mempengaruhi distribusi tegangan dan lendutan. Oleh karena itu, analisis perilaku struktur pelat menjadi dasar dalam memahami pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* terhadap respons struktur secara keseluruhan.

Hubungan Tegangan dan Regangan. Tegangan. Tegangan merupakan besaran fisika yang menggambarkan gaya yang bekerja pada suatu material per satuan luas penampang, sehingga menjadi parameter penting dalam menentukan kekuatan dan keamanan suatu struktur. Dalam konteks penelitian ini, tegangan dianalisis pada *crane hook* menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui distribusi dan nilai maksimum yang terjadi akibat pembebanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum cenderung terpusat pada daerah lengkungan kait, yang menjadi titik kritis dan paling berpotensi mengalami kegagalan. Nilai tegangan yang dihasilkan berbeda tergantung jenis material, di mana baja AISI 1045 dan ST 37 menunjukkan karakteristik tegangan yang hampir serupa namun tetap memiliki perbedaan kecil akibat sifat mekaniknya. Secara umum, semakin besar tegangan yang terjadi pada suatu material, maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya deformasi dan kegagalan struktur, sehingga analisis tegangan sangat

penting untuk memastikan bahwa komponen masih berada dalam batas aman saat digunakan (Wunda et al., 2019).

Pemahaman mengenai sifat material serta responsnya terhadap gaya atau beban merupakan aspek yang sangat penting dalam bidang teknik bangunan. Pada suatu batang prismatik yang memiliki luas penampang seragam sepanjang batang, pemberian beban atau gaya yang bekerja searah dengan sumbu memanjang batang akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang tersebut. Tegangan merupakan besaran yang menyatakan gaya yang bekerja pada setiap satuan luas penampang. Oleh karena itu, besarnya tegangan yang terjadi pada batang prismatik dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara gaya tarik atau tekan dengan luas penampangnya. Secara umum, tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai ukuran intensitas gaya internal yang timbul akibat pengaruh gaya luar, yang mencerminkan kemampuan gaya tersebut dalam menyebabkan perubahan bentuk atau deformasi pada suatu benda.

Secara matematis dituliskan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

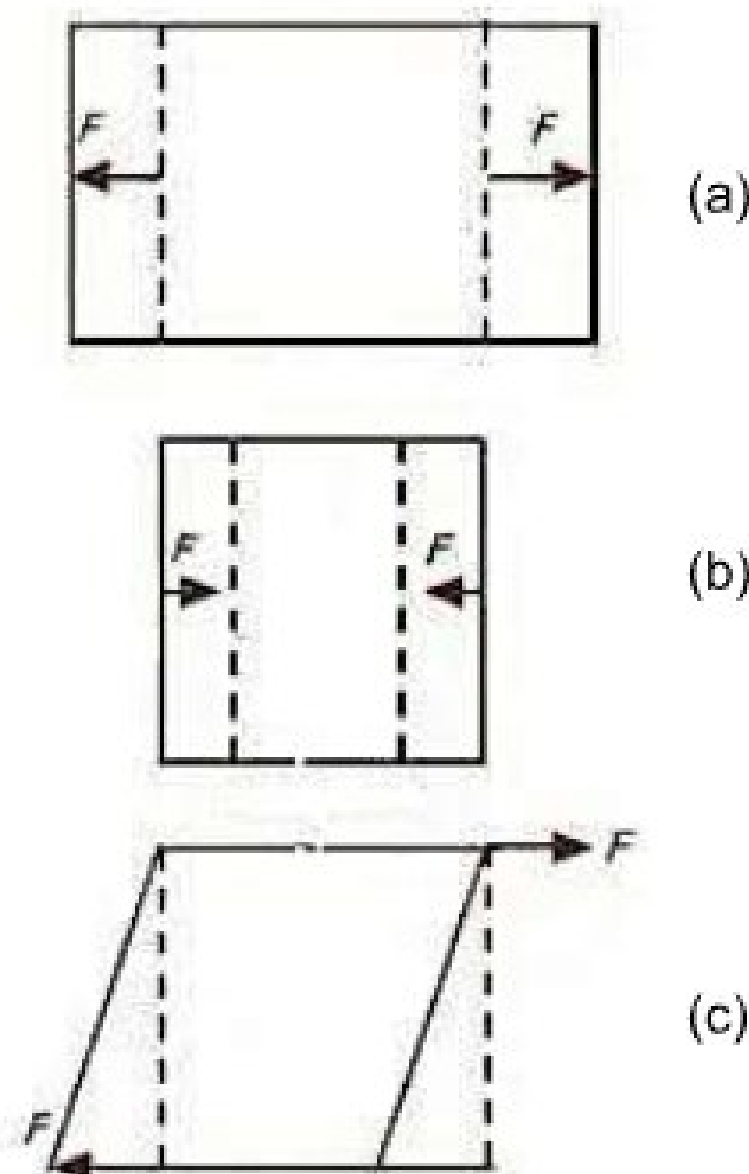
Dengan:

σ = Tegangan (N/mm²)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Jenis-jenis tegangan (Gambar (a) : Tegangan Tarik, Gambar (b) : Tegangan Tekan, Gambar (c) : Tegangan Geser)

Hubungan Tegangan dan Regangan. Regangan. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan:

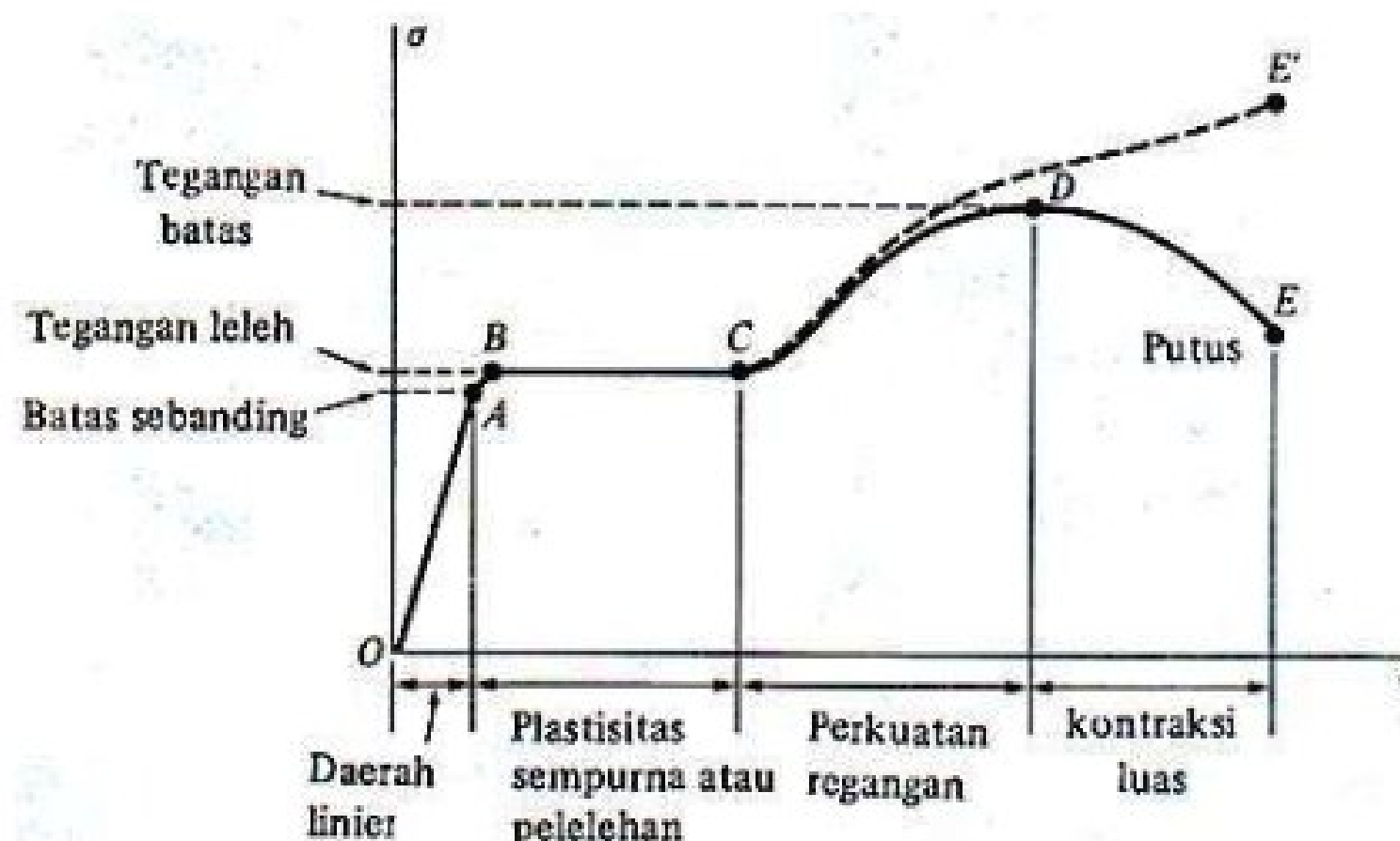
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Dengan:

ε = Regangan

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

L = Panjang mula-mula (mm)



Gambar 3 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Struktural

Titik A (Batas proporsional/batas linier), Titik B (Tegangan leleh/*yield point*), Titik C (Akhir plastisitas sempurna), Titik D (Tegangan maksimum/*ultimate strength*), dan Titik E (Titik putus/*fracture*)

(Sumber: Gere, 1988)

Dengan meningkatnya tegangan hingga melewati batas proporsional, maka regangan mulai meningkat secara lebih cepat untuk setiap pertambahan tegangan. Dengan demikian demikian kurva tegangan-regangan mempunyai kemiringan yang berangsur-angsur semakin kecil sampai pada titik kemiringan titik B kurva tersebut menjadi horizontal. Mulai dari titik B terjadi perpanjangan yang terjadi perpanjangan yang cukup besar pada benda uji tanpa adanya pertambahan gaya tarik (dari cukup besar pada benda uji tanpa adanya pertambahan gaya tarik (dari B ke C), fenomena ini disebut luluh dari bahan, dan titik B disebut titik luluh. Di daerah antara daerah antara B dan C, bahan menjadi plastis sempurna, yang berarti bahwa, Tegangan luluh dan tegangan *ultimite* dari suatu bahan disebut juga masing-masing kekuatan luluh dan kekuatan *ultimite*. Kekuatan adalah sebutan umum yang merujuk pada kapasitas suatu struktur untuk menahan beban (li et al., n.d.).

Hubungan antara tegangan dan regangan pada material elastis digambarkan melalui kurva tegangan-regangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pada bagian awal kurva, hubungan antara tegangan dan regangan bersifat *linier*, yang

menunjukkan bahwa material masih berada dalam daerah elastis. Pada kondisi ini, besarnya tegangan σ sebanding dengan regangan ε yang terjadi, sehingga hubungan keduanya dapat dinyatakan melalui hukum *Hooke*, yaitu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Dengan :

σ = Tegangan (N/mm²)

E = modulus elastisitas (N/mm²)

ε = Regangan

Kemiringan garis linier pada kurva tersebut merepresentasikan modulus elastisitas material, yang menunjukkan tingkat kekakuan material terhadap deformasi. Seiring dengan meningkatnya tegangan hingga melampaui batas elastis, hubungan antara tegangan dan regangan menjadi tidak *linier* dan material mulai mengalami deformasi plastis. Kondisi ini menandakan bahwa regangan yang terjadi bersifat permanen dan material tidak dapat kembali ke bentuk awalnya. Oleh karena itu, pemahaman terhadap hubungan tegangan dan regangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 sangat penting dalam analisis struktur, khususnya untuk memastikan bahwa struktur bekerja dalam batas elastis yang aman selama menerima beban kerja. Berikut disajikan fungsi elemen perkuatan pada struktur pelat kapal pada Tabel 1.

Tabel 1 Fungsi Elemen Perkuatan pada Struktur Pelat Kapal

Elemen Struktur	Lokasi pemasangan	Fungsi Utama	Pengaruh Struktur
Pelat Utama	Bidang Struktur	Menahan beban utama	Tegangan global
Pelat Ikutan	Sambungan pelat	Meningkatkan kekakuan lokal	Menurunkan deformasi
<i>Hard Corner</i>	Sudut struktur	Mengurangi konsentrasi tegangan	Distribusi gaya lebih merata

1.2.4 Pelat Ikutan pada Struktur Kapal

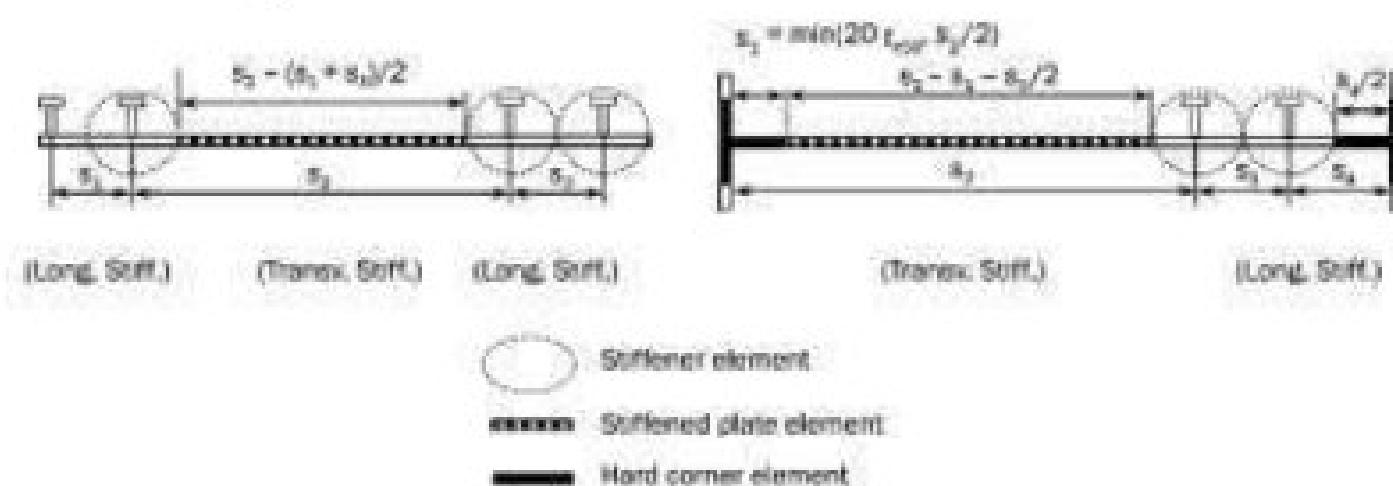
Pelat ikutan merupakan elemen pelat tambahan yang dipasang pada pelat utama dengan tujuan meningkatkan kekakuan lokal dan membantu mendistribusikan beban pada daerah sambungan struktur. Pada struktur kapal, pelat ikutan sering digunakan pada sambungan antara pelat dengan sekat, girder, atau elemen struktural lainnya yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan.

Perbesaran lebar pelat ikutan akan meningkatkan luas penampang efektif dan momen inersia lokal, sehingga mampu menurunkan deformasi dan meningkatkan kekakuan struktur. Namun demikian, perbesaran lebar pelat ikutan juga dapat mengubah pola aliran gaya dan distribusi tegangan pada pelat utama. Oleh karena itu, diperlukan analisis untuk mengetahui sejauh mana perbesaran lebar pelat ikutan memberikan pengaruh positif terhadap perilaku struktur kapal (McKenzie, 2020).

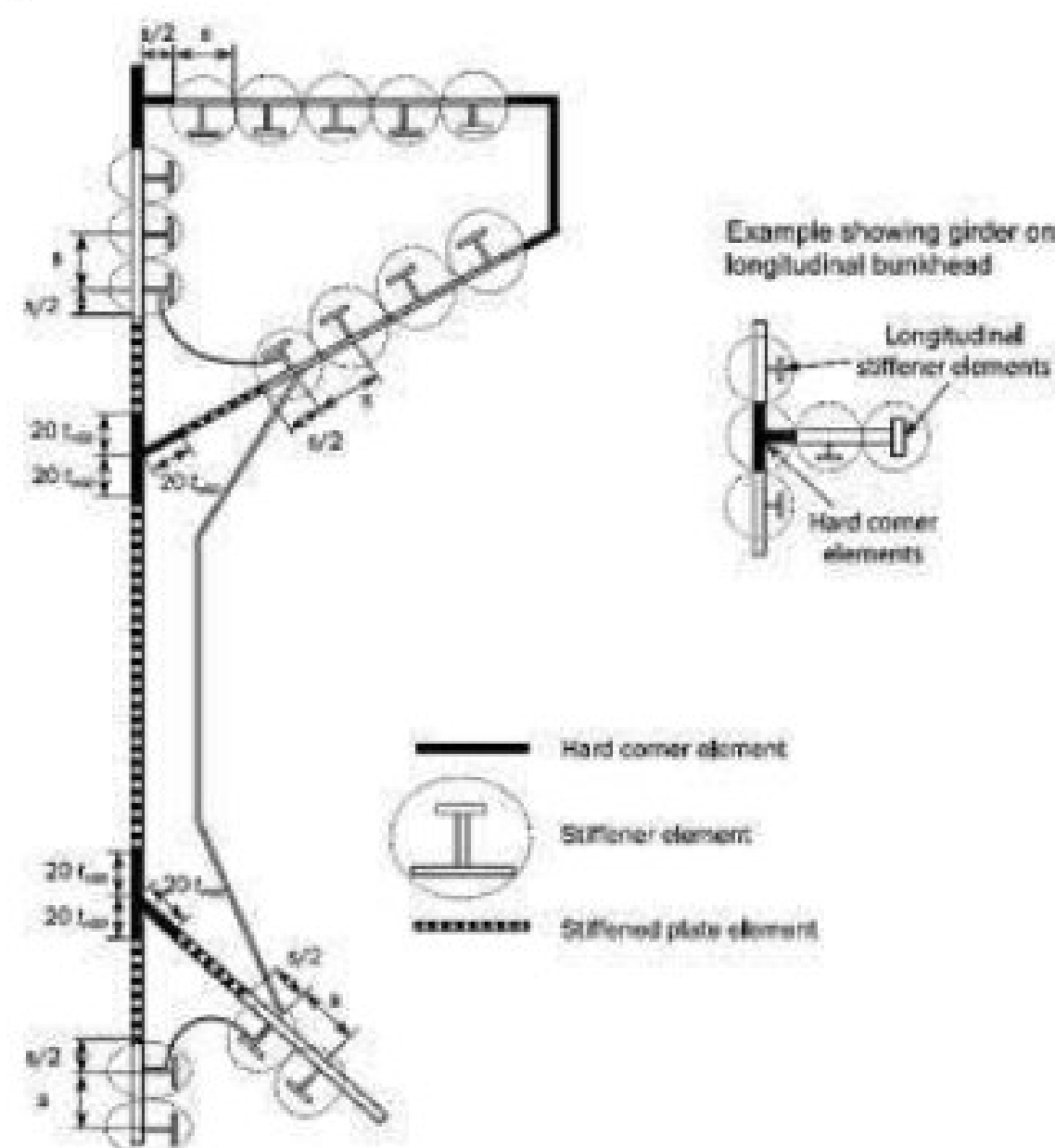
1.2.5 *Hard Corner Element* pada Struktur Kapal

Hard corner element merupakan elemen perkuatan yang dipasang pada daerah sudut struktur kapal untuk mengurangi konsentrasi tegangan akibat perubahan arah aliran gaya yang tajam. Daerah sudut merupakan lokasi kritis karena sering menjadi titik awal terjadinya retak dan kegagalan struktur.

Dengan penambahan *hard corner*, perubahan arah aliran gaya menjadi lebih gradual sehingga distribusi tegangan pada daerah sudut dapat berlangsung lebih merata. Konsep perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner element* serta pengaruhnya terhadap distribusi tegangan pada daerah sudut struktur ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, di mana terlihat bahwa penambahan elemen *hard corner* mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada sudut struktur dibandingkan dengan sudut tanpa perkuatan. Namun, perbesaran yang tidak terkontrol dapat menyebabkan penambahan berat struktur dan menurunkan efisiensi penggunaan material (Peterson, 1974).



Gambar 4 Perluasan lebar pelapisan yang terpasang dan elemen sudut keras (Sumber: IACS, 2014)



Gambar 5 Contoh konfigurasi elemen pelat yang diperkuat, elemen penguat, dan elemen sudut keras pada bagian lambung kapal (Sumber: IACS, 2014)

Pada struktur pelat kapal, daerah sudut atau *knuckle point* merupakan area kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan tinggi akibat perubahan arah geometri pelat secara tajam. Pada pelat dengan sudut *knuckle* lebih besar dari 30°, area pelat yang berdekatan dengan titik *knuckle* didefinisikan sebagai *hard corner*. *Hard corner* ini berfungsi sebagai daerah peralihan yang menerima dan mendistribusikan aliran gaya dari satu bidang pelat ke bidang lainnya, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan struktur.

Luas atau jangkauan *hard corner* ditentukan berdasarkan sistem penegar yang digunakan pada struktur pelat. Pada panel dengan sistem penegar melintang (*transversely framed panels*), jangkauan *hard corner* pada masing-masing sisi sudut diambil sebesar 20 kali ketebalan pelat (20t) yang diukur dari titik *knuckle*. Sementara itu, pada panel dengan sistem penegar memanjang (*longitudinally framed panels*), jangkauan *hard corner* ditetapkan sebesar setengah jarak antar penegar memanjang (0,5s) dari titik *knuckle*. Ketentuan ini bertujuan untuk memastikan bahwa area dengan pengaruh konsentrasi tegangan dapat diperhitungkan secara memadai dalam analisis dan perancangan struktur.

Dalam hal elemen pelat diperkuat oleh penegar memanjang yang tidak menerus (*non-continuous longitudinal stiffeners*), penegar tersebut tidak dianggap sebagai elemen pembawa gaya utama secara kontinu, melainkan hanya berfungsi sebagai pembagi pelat menjadi beberapa panel pelat elementer. Oleh karena itu, analisis struktur dilakukan terhadap masing-masing panel pelat yang terbentuk.

Apabila terdapat bukaan pada elemen pelat berpenegar, maka keberadaan bukaan tersebut harus diperhitungkan karena dapat mempengaruhi distribusi tegangan dan kekakuan lokal struktur. Perhitungan dan evaluasi bukaan dilakukan sesuai dengan ketentuan yang berlaku pada peraturan klasifikasi, sehingga pengaruh bukaan terhadap kekuatan struktur dapat dikendalikan.

Selain itu, apabila pelat yang saling terhubung terbuat dari material baja dengan ketebalan dan/atau tegangan luluh yang berbeda, maka dalam proses perhitungan digunakan nilai ketebalan rata-rata dan/atau tegangan luluh rata-rata. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh representasi sifat material yang lebih realistis terhadap kondisi struktur aktual, sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat mencerminkan perilaku struktur secara menyeluruh.

$$t_{n50} = \frac{t_{1-n50}S_1 + t_{2-n50}S_2}{S} \quad R_{ehp} = \frac{R_{ehp1}t_{1-n50}S_1 + R_{ehp2}t_{2-n50}S_2}{t_{n50}S} \quad (4)$$

Dengan,

t_{n50} = waktu tempuh rata-rata atau waktu karakteristik pada titik n_{50}

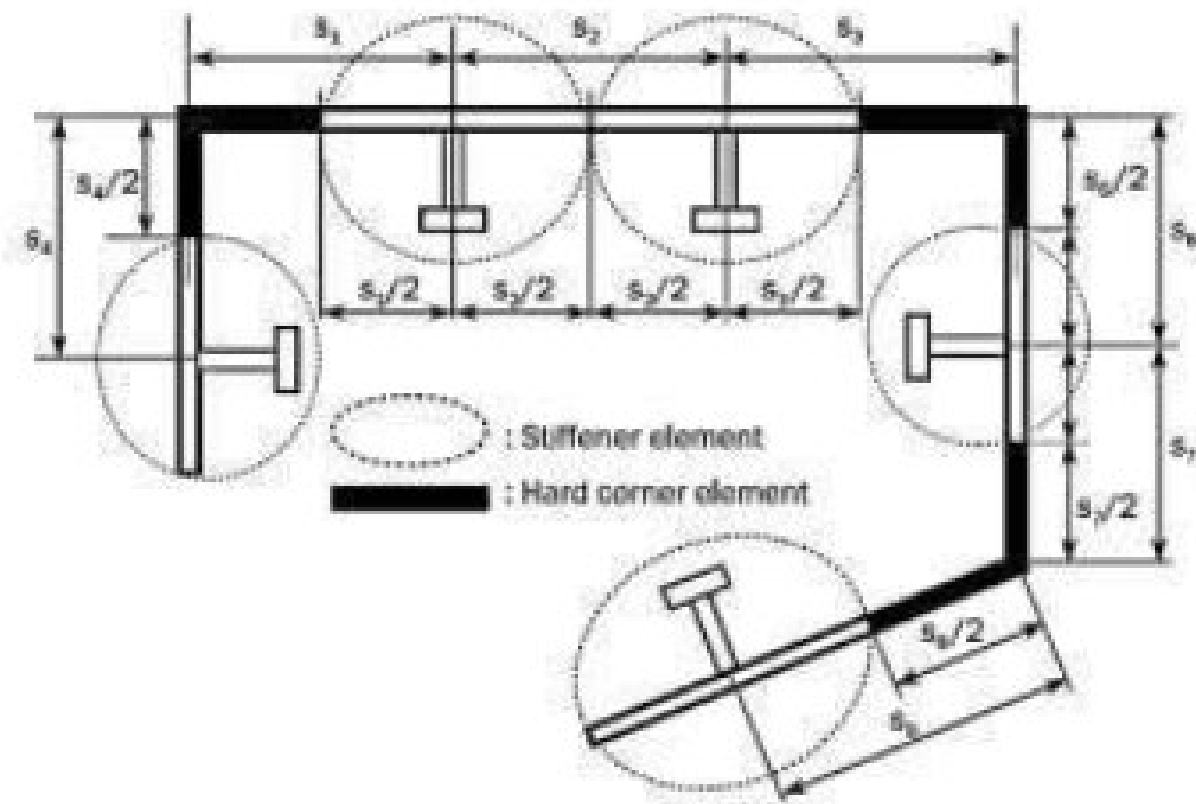
t_{1-n50} = waktu tempuh dari titik awal hingga titik n_{50} melalui segmen pertama

t_{2-n50} = waktu tempuh dari titik kedua hingga titik n_{50} melalui segmen kedua

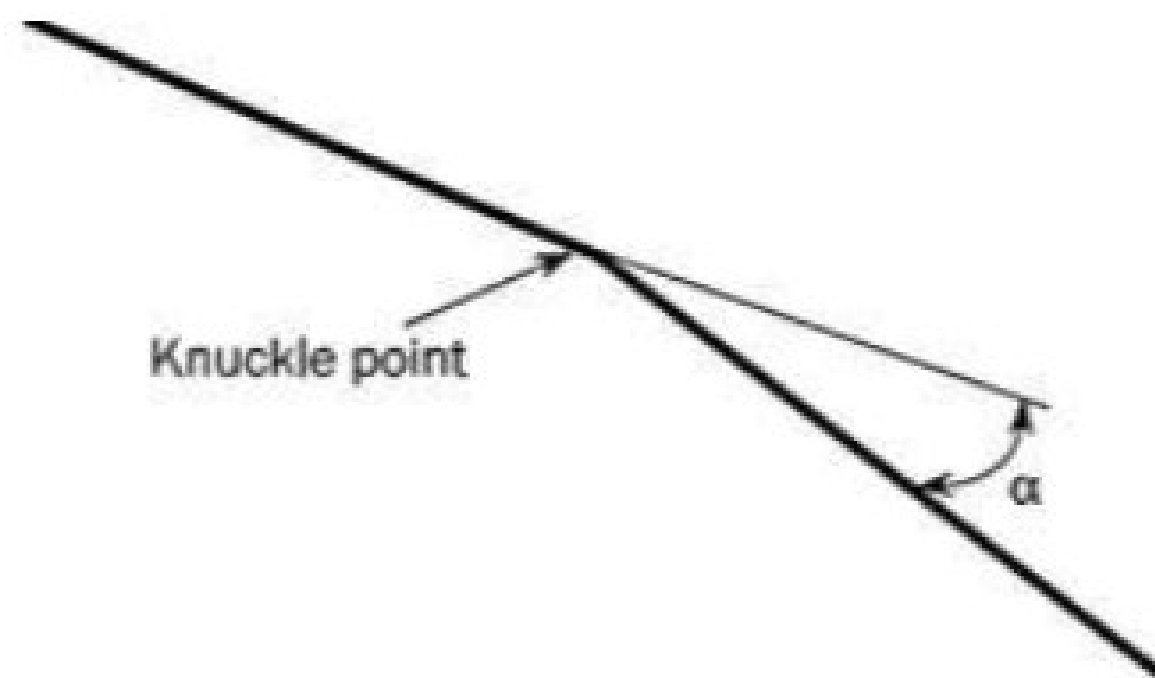
S_1 = panjang lintasan atau jarak segmen pertama

S_2 = panjang lintasan atau jarak segmen kedua

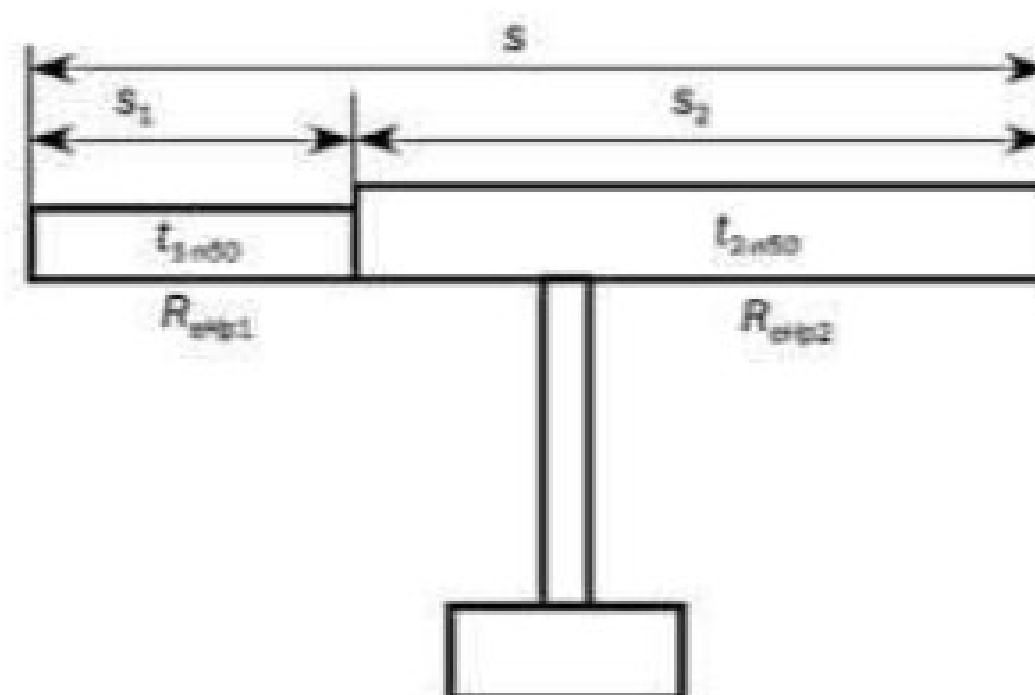
S = total panjang lintasan



Gambar 6 Perluasan lebar pelat yang terpasang dan elemen sudut keras
(Sumber: IACS, 2014)



Gambar 7 Pematerian dengan titik persendian
(Sumber: IACS, 2014)



Gambar 8 Elemen dengan ketebalan dan kekuatan tarik yang berbeda
(Sumber: IACS, 2014)

1.2.6 Konsentrasi Tegangan pada Struktur Pelat

Konsentrasi tegangan merupakan kondisi meningkatnya tegangan lokal pada suatu struktur akibat adanya diskontinuitas geometri, seperti sudut tajam, perubahan penampang, bukaan, serta sambungan antar elemen struktur. Pada struktur kapal, fenomena konsentrasi tegangan menjadi salah satu penyebab utama terjadinya kegagalan lelah (*fatigue*) dan inisiasi retak awal, terutama pada daerah yang mengalami pembebanan dinamis dan siklik secara berulang.

Struktur pelat pada konstruksi kapal umumnya bekerja di bawah kombinasi beban tekan, lentur, dan beban bidang yang kompleks. Dalam kondisi ideal, distribusi tegangan pada pelat bersifat relatif merata. Namun, pada struktur aktual, distribusi tegangan sering kali menjadi tidak seragam akibat adanya diskontinuitas geometri dan perbedaan kekakuan lokal, sehingga memicu terjadinya konsentrasi tegangan yang signifikan (Liu et al., 2021).

Keberadaan diskontinuitas geometris pada struktur pelat berpenegar, khususnya akibat adanya bukaan dan perubahan kekakuan lokal, merupakan salah satu penyebab utama meningkatnya konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan tersebut umumnya terjadi di sekitar tepi bukaan, sambungan antara pelat dan penegar, serta daerah transisi antar elemen struktur yang memiliki perbedaan kekakuan. Tegangan lokal yang tinggi pada daerah-daerah tersebut berpotensi menjadi titik awal terjadinya deformasi plastis, *buckling* lokal, serta penurunan kapasitas kekuatan *ultimite* struktur (Liu et al., 2021).

Lebih lanjut, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku *buckling* dan mekanisme keruntuhan struktur pelat. Pada panel berpenegar yang memiliki diskontinuitas geometri, *buckling* lokal cenderung terjadi terlebih dahulu di sekitar area dengan konsentrasi tegangan tertinggi sebelum berkembang menjadi *buckling* global panel, sehingga menentukan lokasi awal terjadinya keruntuhan struktur (Liu et al., 2021).

Konsentrasi tegangan juga dipengaruhi oleh tingkat kekakuan lokal struktur. Perubahan kekakuan yang mendadak akibat variasi dimensi elemen struktur atau penambahan elemen perkuatan yang tidak proporsional dapat mengubah jalur aliran gaya dan meningkatkan tegangan lokal pada daerah tertentu. Namun, perkuatan lokal yang dirancang dengan tepat mampu memperluas area distribusi beban dan memperhalus aliran gaya, sehingga konsentrasi tegangan dapat dikurangi secara efektif (Liu et al., 2021).

Upaya untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada struktur pelat dapat dilakukan melalui modifikasi geometri struktur. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah perbesaran lebar pelat ikutan dan elemen *hard corner*, yang bertujuan untuk meningkatkan kekakuan lokal dan memperbaiki distribusi tegangan pada daerah kritis struktur. Analisis distribusi tegangan diperlukan untuk memastikan bahwa perubahan geometri tersebut benar-benar mampu menurunkan konsentrasi tegangan tanpa menimbulkan efek negatif pada bagian struktur lainnya (Peterson, 1974).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengendalian konsentrasi tegangan pada struktur pelat kapal memerlukan perhatian khusus terhadap konfigurasi geometris dan kekakuan lokal elemen struktur. Prinsip ini menjadi landasan

penting dalam penelitian mengenai pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan elemen *hard corner*, di mana perubahan dimensi elemen perkuatan diharapkan mampu meningkatkan kinerja struktur dengan menurunkan konsentrasi tegangan pada daerah kritis pelat kapal (Liu et al., 2021).

Rumus Faktor Konsentrasi Tegangan

$$K_t = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nominal}} \quad (5)$$

Dengan :

K_t = Faktor konsentrasi tegangan

σ_{maks} = Tegangan maksimum (N/mm²)

$\sigma_{nominal}$ = Tegangan nominal (N/mm²)

1.2.7 Teori Pelat

Teori pelat digunakan untuk menganalisis perilaku pelat tipis yang menerima beban lentur dan geser. Teori ini menjelaskan hubungan antara beban, lendutan, dan tegangan pada pelat dengan mempertimbangkan ketebalan pelat yang relatif kecil. Dalam struktur kapal, teori pelat menjadi dasar dalam menganalisis respons pelat utama, pelat ikutan, dan *hard corner* terhadap beban kerja (Szilard, 1974).

Tegangan lentur pada pelat dipengaruhi oleh momen lentur dan momen inersia penampang. Perubahan dimensi lebar pelat ikutan dan *hard corner* secara langsung memengaruhi momen inersia, sehingga berdampak pada tegangan dan deformasi.

Rumus Tegangan Lentur

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (6)$$

Dengan :

σ = Tegangan lentur (Nmm²)

M = Momen lentur (Nmm)

y = Jarak serat (mm)

I = Momen Inersia (mm⁴)

Rumus Momen Inersia Pelat

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (7)$$

Dengan :

I = Momen Inersia (mm⁴)

b = Lebar pelat (mm)

t = Ketebalan pelat (mm)

Teori pelat memberikan landasan teoritis dalam mengevaluasi pengaruh perubahan dimensi pelat terhadap kekakuan dan distribusi tegangan. Teori pelat juga menjelaskan pengaruh kondisi batas dan bentuk geometri terhadap respons pelat. Oleh karena itu, teori ini menjadi landasan penting dalam menganalisis pengaruh perbesaran lebar elemen pelat terhadap kinerja struktur kapal.

1.2.8 Metode Elemen Hingga dalam Analisis Struktur

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*), yang merupakan salah satu pendekatan paling andal untuk menganalisis perilaku runtuh nonlinier (*nonlinear collapse behavior*) pada struktur. Seiring dengan perkembangan kemampuan komputasi, metode ini semakin banyak digunakan oleh para peneliti melalui penerapan *Nonlinear Finite Element Analysis (NLFEA)* untuk mengestimasi kapasitas dan kekuatan struktur secara lebih akurat. Hasil analisis numerik tersebut umumnya dibandingkan dengan solusi analitis guna mengevaluasi tingkat keandalan dan validitas model yang digunakan (Alie Muis et al., 2022).

Metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis struktur dengan geometri kompleks dan kondisi batas yang beragam. Metode ini sangat sesuai untuk menganalisis struktur kapal yang memiliki detail sambungan dan elemen perkuatan seperti pelat ikutan dan *hard corner*.

Metode ini diterapkan pada permasalahan rekayasa yang tidak dapat diselesaikan secara tepat menggunakan solusi analitis. Prinsip dasar metode elemen hingga adalah mendiskretisasi suatu benda atau sistem yang akan dianalisis ke dalam sejumlah elemen berhingga. Setiap elemen saling terhubung melalui titik-titik tertentu yang disebut *node*. Selanjutnya, disusun persamaan matematika yang merepresentasikan perilaku masing-masing elemen sehingga secara keseluruhan dapat menggambarkan respons struktur yang dianalisis. Proses pembagian suatu benda ke dalam elemen-elemen berhingga tersebut dikenal sebagai proses *meshing*.

Dasar *FEA* bergantung pada penguraian domain menjadi sejumlah subdomain (*element*) yang terbatas dimana solusi perkiraan sistematis dibangun dengan menerapkan metode variasional atau metode *Weighted Residual*. Kemampuan untuk mendiskritisasi domain tidak beraturan dengan elemen hingga membuat metode ini menjadi alat analisis yang berharga dan praktis untuk solusi masalah terhadap keadaan batas, kondisi awal (*initial condition*) dan masalah eigenvalue yang timbul dalam berbagai disiplin ilmu teknik (Tawoeda et al., 2017)

Metode analisis elemen hingga memerlukan langkah-langkah utama sebagai berikut:

1. Diskretisasi domain menjadi jumlah subdomain yang terbatas (elemen).
2. Pemilihan fungsi interpolasi.
3. Pengembangan elemen matriks untuk subdomain (elemen).
4. Susunan elemen matriks untuk setiap subdomain untuk mendapatkan matriks global untuk keseluruhan domain.
5. Solusi dari persamaan.
6. Perhitungan tambahan (jika diinginkan)

Dalam penelitian ini, *FEM* digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi lebar pelat ikutan dan *hard corner* terhadap distribusi tegangan dan deformasi struktur. Metode ini memungkinkan evaluasi perilaku struktur secara lebih rinci dibandingkan dengan metode analitis sederhana (Zienkiewicz & Taylor, 2000; Cook, 2002).

1.2.9 Kriteria Kinerja Struktur

Kinerja struktur kapal dapat dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu tegangan maksimum, deformasi, dan efisiensi penggunaan material. Tegangan maksimum harus berada di bawah batas tegangan izin material, sedangkan deformasi harus memenuhi kriteria kekakuan struktur.

Rumus Kekakuan Lentur Pelat

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

Dengan :

D = Kekakuan lentur pelat (Nmm)

E = Modulus elastisitas (N/mm²)

t = Ketebalan pelat (mm)

ν = Rasio Poisson

Dalam konteks penelitian ini, konfigurasi perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* dikatakan optimal apabila mampu menurunkan tegangan maksimum dan deformasi secara signifikan tanpa penambahan berat struktur yang berlebihan, serta tetap memenuhi standar keselamatan yang berlaku (Paik & Thayamballi, 2003).

1.2.10 Software ANSYS

ANSYS merupakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang digunakan untuk memodelkan dan menyelesaikan berbagai permasalahan dalam bidang mekanika. Program ini mampu melakukan analisis statik dan dinamik, analisis struktur baik linier maupun *nonlinier*, serta analisis perpindahan panas, aliran fluida, dan permasalahan lain yang berkaitan dengan akustik dan elektromagnetik. Hasil analisis yang diperoleh dari ANSYS antara lain berupa gaya aksial, gaya geser, gaya lentur, momen, serta perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada struktur.

Beberapa penelitian memanfaatkan metode elemen hingga untuk menganalisis perilaku lentur struktur dengan membandingkannya terhadap metode beda hingga. Kajian tersebut umumnya membahas pengaruh faktor-faktor yang memengaruhi lendutan serta jumlah elemen yang digunakan dalam proses pemodelan. Metode elemen hingga diterapkan dengan bantuan perangkat lunak berbasis *finite element package*, sedangkan metode beda hingga dianalisis menggunakan pemodelan numerik yang didukung oleh program ANSYS. Pada penelitian tersebut, pembebanan diberikan pada pelat alas dalam bentuk beban yang konstan terhadap luas permukaan pelat. Pembebanan yang digunakan berupa tekanan (*pressure*) dan beban *uniaxial* yang kemudian didistribusikan ke seluruh area pelat.

Selain itu, analisis juga dilakukan terhadap penentuan jenis elemen sebagai alternatif dalam mendefinisikan suatu penegar. Penegar dimodelkan sebagai suatu garis yang memiliki kekakuan ekuivalen dengan penegar sebenarnya. Secara umum, proses penyelesaian menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak ANSYS terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu:

1. *Preprocessing* : Pendefinisian Masalah

Langkah umum dalam *processing* terdiri dari :

- a. Mendefinisikan *keypoint/lines/areas/volume*.
- b. Mendefinisikan tipe elemen dan bahan yang digunakan/sifat *geometric*.
- c. *Mesh lines/areas/volumes* sebagaimana dibutuhkan. Jumlah detail yang dibutuhkan akan tergantung pada dimensi daerah yang dianalisis.

2. *Solution* : *assigning loads, constrains and solving*

Proses ini merupakan penentuan beban (titik atau tekanan), *constrains* (translasi dan rotasi) dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang telah di *set*.

3. *Postprocessing* : *further processing and viewing of the results* diagram kontur tegangan (*stress*) atau pemetaan suhu.

1.2.11 Bentuk Konstruksi Struktur Pelat Kapal

Struktur kapal pada dasarnya merupakan sistem struktur ruang yang tersusun dari elemen-elemen pelat dan penegar yang saling terhubung untuk membentuk konstruksi yang mampu menahan berbagai jenis beban selama masa operasional kapal. Elemen pelat menjadi komponen dominan yang membentuk bagian utama kapal, seperti pelat lambung, pelat alas, pelat geladak, dan sekat, yang bekerja secara simultan dalam menerima beban hidrostatik, beban gelombang, serta beban operasional lainnya (Hughes, 1988).

Secara geometris, pelat pada struktur kapal dikategorikan sebagai pelat tipis, yaitu pelat dengan ketebalan yang relatif kecil dibandingkan dengan dimensi panjang dan lebarnya. Karakteristik ini menyebabkan perilaku mekanik pelat sangat dipengaruhi oleh pembebanan lentur dan kondisi batas pada tepi pelat. Oleh karena itu, bentuk konstruksi pelat tidak hanya ditentukan oleh dimensi global, tetapi juga oleh detail sambungan dan elemen perkuatan lokal yang digunakan (Ibrahim et al., 2015)

Dalam konstruksi kapal, perubahan bentuk atau diskontinuitas geometri, seperti pertemuan antara pelat dengan penegar, sekat, atau elemen sudut, berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan yang signifikan. Daerah-daerah ini sering menjadi lokasi kritis terjadinya deformasi berlebih maupun inisiasi retak akibat beban statis maupun siklik. Oleh karena itu, desain bentuk konstruksi harus mempertimbangkan kelancaran aliran gaya agar tegangan dapat terdistribusi secara merata (Peterson, 1974).

Salah satu bentuk konstruksi yang umum digunakan untuk mengurangi konsentrasi tegangan adalah penambahan elemen perkuatan berupa pelat ikutan. Pelat ikutan merupakan pelat tambahan yang dipasang mengikuti pelat utama dengan tujuan memperbesar luas efektif penampang dan meningkatkan kekakuan lokal struktur. Keberadaan pelat ikutan memungkinkan distribusi gaya yang lebih merata

pada daerah sambungan, sehingga mampu menurunkan tegangan maksimum yang terjadi pada pelat utama (Paik & Thayamballi, 2003).

Selain pelat ikutan, bentuk konstruksi lain yang berperan penting dalam meningkatkan kinerja struktur adalah penggunaan *hard corner element* pada daerah sudut. *Hard corner* dirancang untuk menghaluskan perubahan arah aliran gaya pada sudut struktur yang tajam, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan akibat diskontinuitas geometri. Penambahan elemen ini sangat penting pada struktur kapal karena sudut-sudut struktur merupakan titik rawan terhadap kegagalan lelah (McKenzie, 2020).

Perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* merupakan salah satu pendekatan geometris dalam optimasi bentuk konstruksi. Perubahan lebar elemen tersebut akan memengaruhi momen inersia dan kekakuan lentur lokal struktur, yang pada akhirnya berdampak pada distribusi tegangan dan deformasi. Namun, perbesaran dimensi yang tidak terkontrol dapat meningkatkan berat struktur dan menurunkan efisiensi penggunaan material (Szilard, 1974).

Oleh karena itu, analisis bentuk konstruksi pelat kapal tidak hanya berfokus pada kekuatan, tetapi juga pada keseimbangan antara kekakuan, efisiensi material, dan keselamatan struktur. Kajian terhadap pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* menjadi penting untuk menentukan konfigurasi bentuk konstruksi yang paling optimal dalam mendukung kinerja struktur kapal secara keseluruhan (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, penelitian ini berupaya menjawab pertanyaan - pertanyaan berikut:

1. Bagaimana pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* terhadap perilaku struktur?
2. Konfigurasi perbesaran lebar seperti apa yang memberikan hasil paling optimal?

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner* terhadap perilaku struktur.
2. Mengetahui konfigurasi perbesaran lebar seperti apa yang memberikan hasil paling optimal.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Bagi akademis, menjadi referensi akademik dalam pengembangan materi perkuliahan yang berkaitan dengan mekanika struktur, struktur kapal, dan metode elemen hingga.
2. Bagi industri, memberikan acuan teknis bagi industri galangan kapal dan perancang struktur kapal dalam menentukan dimensi pelat ikutan dan *hard*

corner yang efektif dan efisien.

3. Bagi peneliti, memberikan gambaran metodologi analisis numerik menggunakan metode elemen hingga pada struktur kapal.
4. Menambah kajian ilmiah mengenai pengaruh perubahan geometri, khususnya perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner*, terhadap distribusi tegangan dan deformasi pada struktur pelat kapal.

1.6 Batasan Masalah

1. Penelitian dibatasi pada analisis struktur pelat kapal yang dilengkapi dengan pelat ikutan dan *hard corner* elemen, dengan model struktur yang disederhanakan.
2. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga (*FEM*) dengan asumsi material baja kapal bersifat elastis *linier*.
3. Parameter yang divariasikan tebal pelat ikutan pada *hard corner*, sedangkan parameter lain seperti material, dan kondisi batas dianggap konstan.
4. Pembebanan yang dianalisis dibatasi pada beban statis, serta hasil penelitian difokuskan pada evaluasi tegangan dan deformasi untuk menentukan konfigurasi perbesaran lebar yang optimal.

1.7 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini dibagi dalam beberapa bagian untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca agar dapat menginterpretasikan hasil tulisan ini secara tepat, maka dibuat sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian yang menjelaskan pentingnya analisis struktur pelat kapal, khususnya terkait pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner element* terhadap perilaku struktur. Selain itu, bab ini juga menguraikan rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta kerangka pemikiran penelitian yang menjadi dasar dalam pelaksanaan penelitian.

BAB II: METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian. Uraian meliputi waktu dan tempat penelitian, jenis penelitian, objek dan model penelitian, penentuan variabel penelitian, serta tahapan pemodelan dan analisis struktur pelat kapal menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Pada bab ini juga disajikan diagram alir penelitian yang menggambarkan alur penelitian secara sistematis dari tahap awal hingga tahap akhir.

BAB III: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis numerik yang diperoleh dari simulasi metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *ANSYS*. Hasil yang ditampilkan

meliputi distribusi tegangan, deformasi struktur, serta pengaruh variasi lebar pelat ikutan dan *hard corner element* terhadap perilaku struktur pelat kapal. Selanjutnya, dilakukan pembahasan hasil analisis dengan mengaitkannya pada landasan teori untuk mengevaluasi kinerja struktur dan menentukan konfigurasi perbesaran lebar yang paling optimal.

BAB IV: PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, sebagai jawaban atas rumusan masalah penelitian. Selain itu, bab ini juga memuat saran yang dapat digunakan sebagai rekomendasi dalam perancangan struktur kapal serta sebagai bahan pengembangan penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan analisis struktur pelat dan elemen perkuatan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner element* melalui metode *Finite Element Analysis*.

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory (OSAREL)* Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan mulai dari Desember 2025 – April 2026.

2.3 Penyajian Data

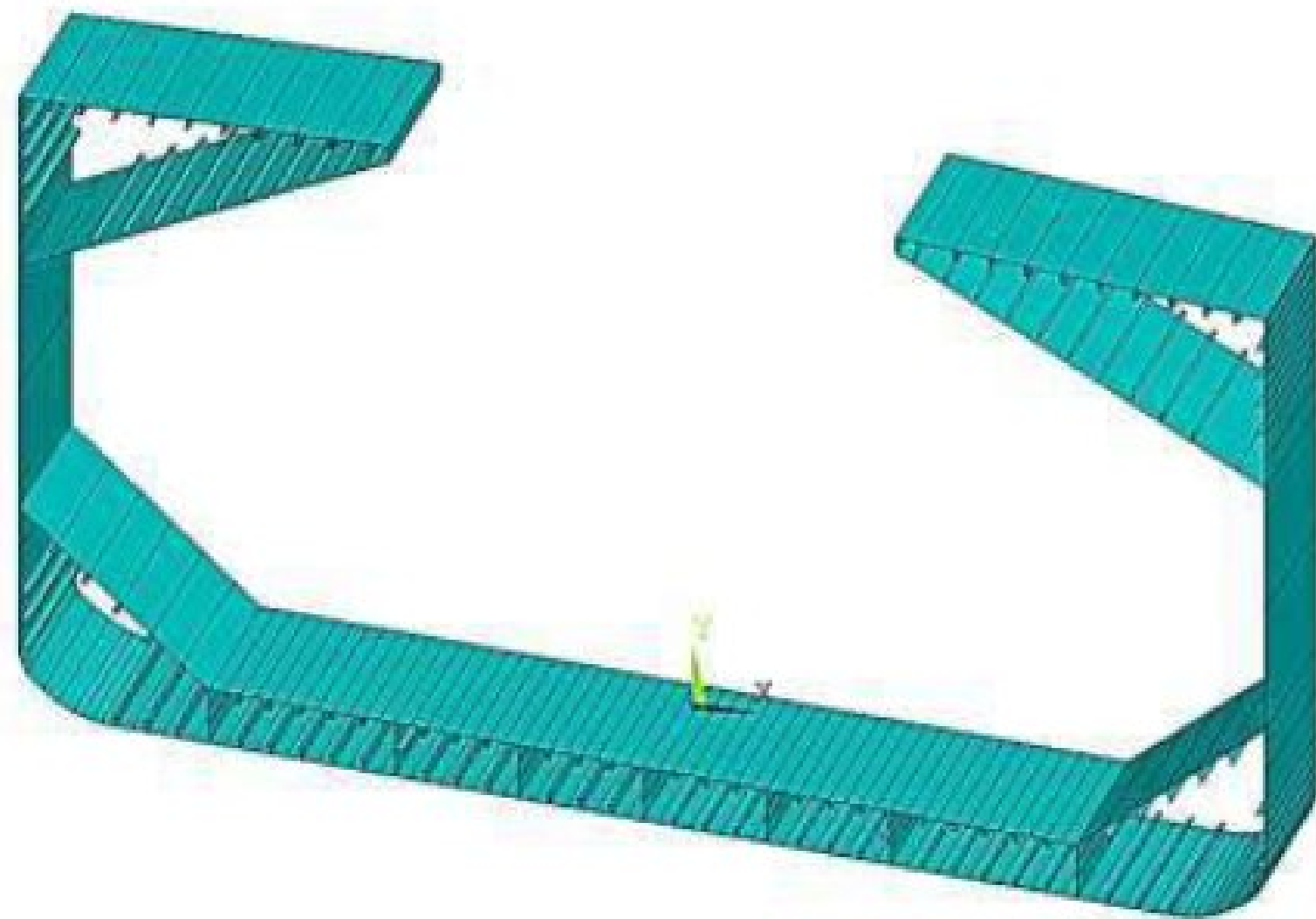
Tahap pengumpulan dan penyajian data merupakan bagian yang sangat penting dalam penelitian berbasis simulasi numerik, khususnya pada analisis struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Keakuratan hasil simulasi sangat dipengaruhi oleh kualitas dan ketepatan data input yang didefinisikan pada tahap pra-pemrosesan (*pre-processing*). Berdasarkan model struktur pada gambar, terlihat bahwa objek yang dianalisis merupakan bagian dari struktur lambung kapal *bulk carrier* dengan konfigurasi pelat berpenegar yang mengalami variasi distribusi tegangan akibat pembebanan.

Dalam penelitian ini, data yang digunakan diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama, yaitu data geometri struktur, sifat mekanis material, dan parameter kondisi degradasi atau korosi. Data geometri mencakup bentuk dan dimensi pelat, konfigurasi sambungan antar elemen, serta ukuran dan jarak penegar yang mengikuti desain aktual struktur kapal. Geometri yang kompleks seperti pada Gambar 9, khususnya pada daerah sambungan dan perubahan bentuk (*hard corner*), menjadi faktor penting karena berpengaruh terhadap konsentrasi tegangan yang terlihat pada hasil kontur.

Sifat mekanis material meliputi parameter seperti modulus elastisitas, rasio Poisson, serta tegangan luluh yang merepresentasikan karakteristik baja struktural yang umum digunakan pada kapal *bulk carrier*. Parameter ini menentukan bagaimana material merespons pembebanan, baik dalam kondisi elastis maupun mendekati plastis.

Objek yang dianalisis berupa pelat berpenegar (*stiffened plate*) yang merupakan bagian kritis dari struktur lambung kapal. Model numerik yang disusun bertujuan untuk menggambarkan perilaku struktur terhadap pengaruh pembebanan dan degradasi akibat korosi. Data yang telah dikumpulkan kemudian disajikan dalam bentuk visualisasi kontur tegangan dan deformasi seperti pada gambar, sehingga

memudahkan dalam mengidentifikasi area kritis, mengevaluasi kekuatan struktur, serta menarik kesimpulan terkait kinerja struktural kapal secara keseluruhan.



Gambar 9 Geometri Model Kapal *Bulk Carrier*
(Sumber: Hasil Olahan, 2026)

Data kapal yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada karakteristik umum kapal *bulk carrier*, meliputi panjang, lebar, tinggi, serta konfigurasi struktur lambung pada area yang dianalisis. Data ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan model numerik agar tetap merepresentasikan kondisi struktur aktual secara proporsional.

Pemodelan difokuskan pada struktur pelat berpenegar (*stiffened plate*) yang terdiri dari pelat dan elemen penegar (*stiffener*). Ketebalan pelat dan ukuran penegar ditentukan berdasarkan standar desain kapal dengan asumsi kondisi awal tanpa korosi, serta divariasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap kekakuan dan kekuatan struktur.

Selanjutnya, disajikan data Kapal *Bulk Carrier*, dengan ukuran utama seperti pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2 Dimensi Utama Kapal *Bulk Carrier*

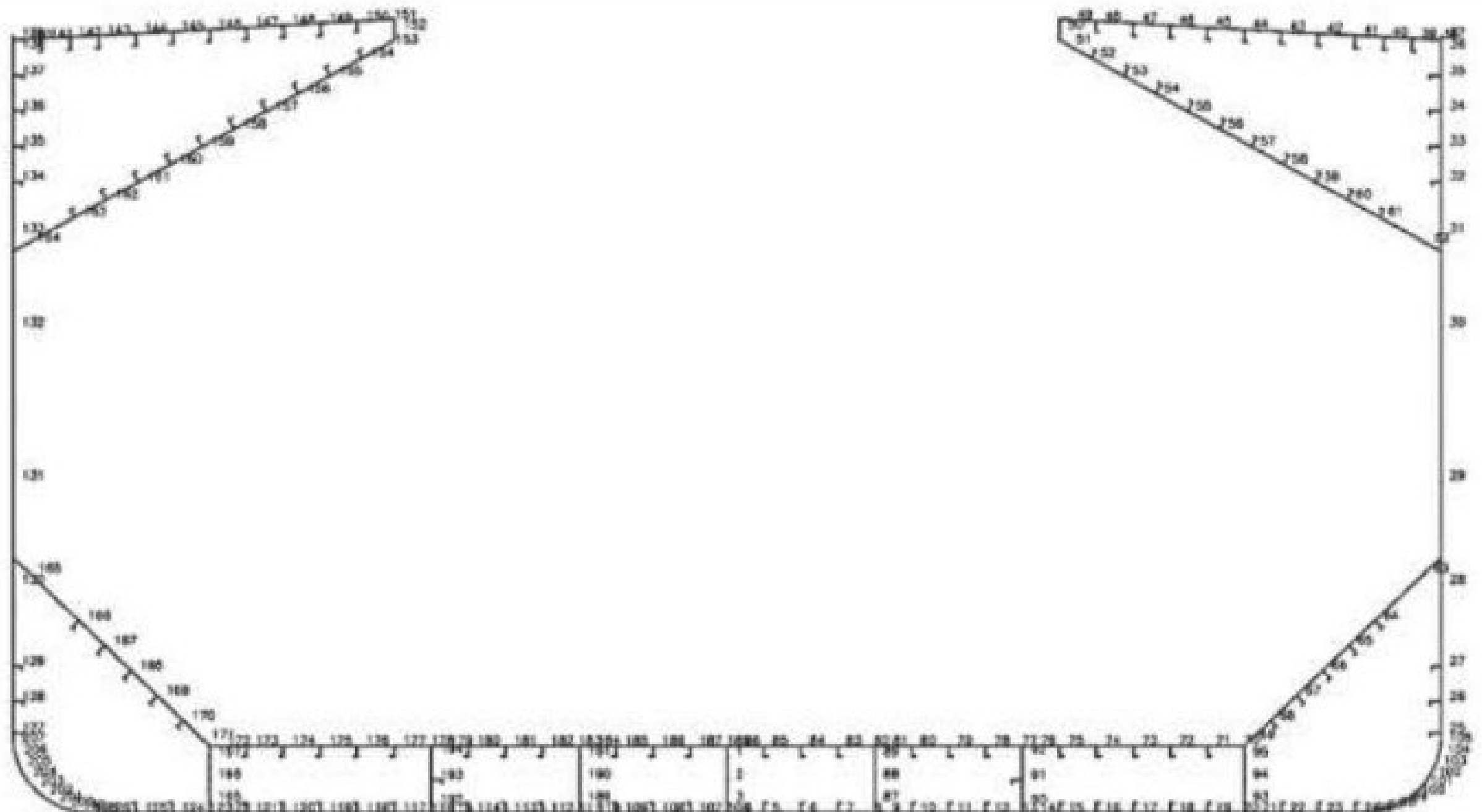
Parameter	Nilai	Unit
Lebar Kapal (B)	32.260	mm
Tinggi Kapal (H)	18.300	mm
Jarak Gading (Af)	4.175	mm

Adapun properti material yang digunakan pada model penelitian ini seperti pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3 Properti Material

Parameter	Nilai	Unit
Elastic Modulus	2×10^5	N/mm ²
Yield Strength	370 410	N/mm ²
Poisson Ratio	0,3	

Adapun konfigurasi *stiffener* penampang dan spesifikasi material kapal *bulk carrier* seperti pada Gambar 10 dan Tabel 4 dan 5 sebagai berikut:



Gambar 10 Konfigurasi Penampang *Midship* Kapal *Bulk Carrier*

Tabel 4 Konfigurasi Material Pelat Ikutan Kapal *Bulk Carrier*

No.	Panjang Pelat (mm)	Tebal Pelat Ikutan (mm)	Yield Strength (N/mm ²)
1	530	15,5	370
2	530	15,5	370
3	530	15,5	370
4	417,5	17	370
5	835	15,5	370
6	835	15,5	370
7	835	15,5	370
8	417,5	15,5	370
9	417,5	15,5	370

Lanjutan Tabel 4

No.	Panjang Pelat (mm)	Tebal Pelat Ikutan (mm)	Yield Strength (N/mm²)
10	835	15,5	370
11	835	15,5	370
12	417,5	15,5	370
13	417,5	15,5	370
14	835	15,5	370
15	835	15,5	370
16	835	15,5	370
17	835	15,5	370
18	835	15,5	370
19	417,5	15,5	370
20	417,5	15,5	370
21	835	15,5	370
22	835	15,5	370
23	552,5	15,5	370
24	417,5	15,5	370
25	835	16	370
26	1.707,5	16	370
27	1290	16	370
28	3625	16	370
29	3625	16	370
30	835	16	370
31	1.247,5	20	370
32	835	20	370
33	835	20	370
34	835	20	370
35	417,5	20	370
36	100	20	370
37	323	26,5	370
38	646,1	26,5	370
39	646,1	26,5	370
40	741,2	26,5	370
41	836,4	26,5	370
42	836,4	26,5	370
43	836,4	26,5	370
44	836,4	26,5	370
45	836,4	26,5	370

Lanjutan Tabel 4

No.	Panjang Pelat (mm)	Tebal Pelat Ikutan (mm)	Yield Strength (N/mm²)
46	836,4	26,5	370
47	836,4	26,5	370
48	418,2	26,5	370
49	500	16	370
50	417,5	16	370
51	835	16	370
52	835	16	370
53	835	16	370
54	835	15	370
55	835	15	370
56	835	15	370
57	835	15	370
58	835	13,5	370
59	835	13,5	370
60	1.223,1	13,5	370
61	805,6	13,5	370
62	1059,1	13	410
63	1476,6	13	410
64	835	13	410
65	835	14,5	410
66	835	14,5	410
67	835	14,5	410
68	417,5	14,5	410
69	417,5	17	410
70	835	17	410
71	835	17	410
72	835	17	410
73	835	17	410
74	835	17	410
75	417,5	17	410
76	417,5	17	410
77	835	17	410
78	835	17	410
79	835	17	410
80	417,5	17	410
81	417,5	17	410

Lanjutan Tabel 4

No.	Panjang Pelat (mm)	Tebal Pelat Ikutan (mm)	Yield Strength (N/mm ²)
82	835	17	410
83	835	17	410
84	835	17	410
85	417,5	17	410
86	530	10	410
87	530	10	410
88	530	10	410
89	390	13	410
90	795	13	410
91	405	13	410
92	530	10	410
93	530	10	410
94	530	10	410
95	0	15,5	410
96	265	15,5	410
97	265	15,5	410
98	265	15,5	410
99	208,8	17	410
100	417,5	15,5	410
101	417,5	15,5	410
102	417,5	15,5	410
103	208,8	15,5	410
104	208,8	15,5	410

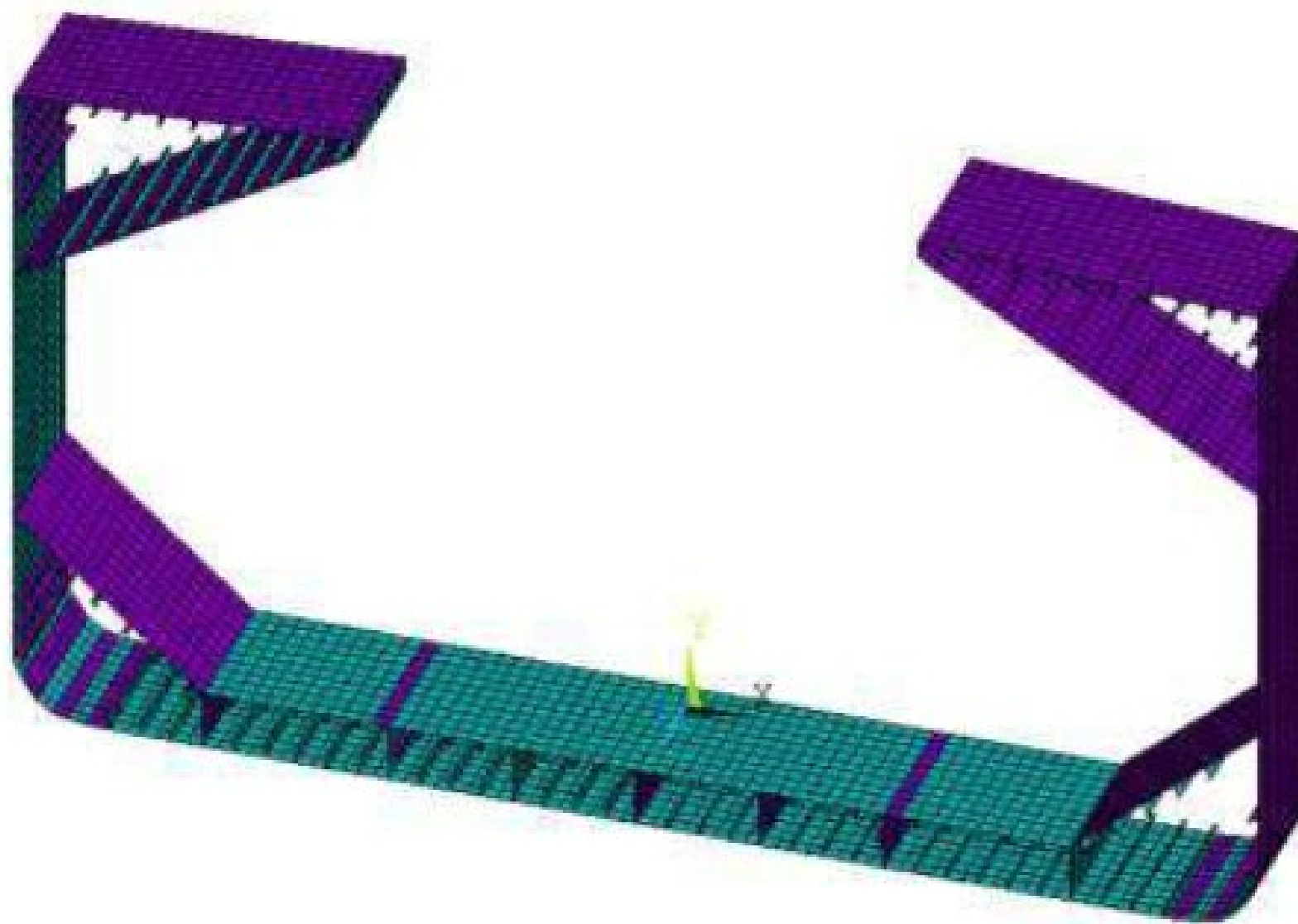
Tabel 5 Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal *Bulk Carrier*

Jenis <i>Stiffener</i>	Tinggi Web (mm)	Tebal Web (mm)	Lebar Flange (mm)	Tebal Flange (mm)
<i>Angle-Bar</i>	250	10	90	15
	200	9	90	14
	300	13	90	17

Penyajian data kapal dan ketebalan pelat ini umumnya ditampilkan dalam bentuk tabel untuk memberikan gambaran yang sistematis dan mudah dipahami. Dengan adanya data ini, proses analisis dapat dilakukan secara lebih terarah, serta hasil simulasi yang diperoleh dapat dibandingkan dengan kondisi desain awal maupun kondisi setelah mengalami degradasi. Hal ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kinerja struktur kapal *bulk carrier*, khususnya dalam menghadapi pengaruh korosi terhadap kekuatan dan keamanannya.

2.4 Analisa Data

Dalam konteks analisis struktur menggunakan metode elemen hingga (*FEM*), panjang kapal menjadi parameter geometris utama yang mempengaruhi distribusi beban sepanjang struktur. Semakin besar panjang kapal, maka semakin kompleks distribusi gaya internal yang bekerja, seperti momen lentur dan gaya geser, yang akan berdampak pada distribusi tegangan pada pelat dan penegar. Dalam proses pemodelan, digunakan ukuran *meshing* sebesar 550 mm untuk memperoleh keseimbangan antara ketelitian hasil analisis dan efisiensi waktu komputasi seperti pada Gambar 11.



Gambar 11 *Meshing*
(Sumber: Hasil Olahan, 2026)

Ketebalan pelat ikutan (*plating thickness*) memiliki peranan penting dalam menentukan kekakuan dan kapasitas menahan beban. Pelat dengan ketebalan yang lebih besar cenderung memiliki kekakuan yang lebih tinggi sehingga mampu mereduksi deformasi dan menurunkan konsentrasi tegangan. Sebaliknya, penurunan ketebalan, baik akibat desain maupun korosi, akan menyebabkan peningkatan tegangan lokal yang dapat terlihat pada hasil kontur simulasi, khususnya pada area kritis seperti sambungan dan sudut struktur.

Nilai *yield strength* material digunakan sebagai batas untuk mengevaluasi keamanan struktur. Hasil analisis tegangan dibandingkan dengan nilai ini untuk menentukan apakah struktur masih berada dalam kondisi elastis atau telah mendekati kegagalan plastis. Apabila tegangan hasil simulasi mendekati atau melebihi *yield strength*, maka area tersebut dianggap berpotensi mengalami deformasi permanen dan memerlukan perhatian lebih lanjut dalam desain atau perbaikan.

Ukuran elemen penegar (*stiffener*), yang meliputi tinggi, lebar, dan ketebalan, juga berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dan kekakuan struktur. Penegar berfungsi untuk meningkatkan kapasitas pelat dalam menahan beban, sehingga konfigurasi dan dimensinya akan mempengaruhi kemampuan struktur dalam mereduksi tegangan dan mencegah terjadinya *buckling*. Penegar yang lebih besar umumnya memberikan kontribusi kekakuan yang lebih tinggi, namun harus tetap mempertimbangkan aspek efisiensi berat dan biaya.

Dengan mengintegrasikan seluruh data tersebut ke dalam model numerik, analisis dapat dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur secara menyeluruh. Hasil yang diperoleh biasanya disajikan dalam bentuk kontur tegangan dan deformasi, sehingga memungkinkan identifikasi area dengan tegangan maksimum serta evaluasi apakah struktur memenuhi kriteria kekuatan yang disyaratkan. Analisis ini juga dapat digunakan untuk melakukan studi variasi parameter, seperti perubahan ketebalan pelat atau ukuran penegar, guna mendapatkan konfigurasi struktur yang optimal dan aman terhadap beban kerja serta pengaruh perbesaran lebar pelat ikutan dan *hard corner element*.

2.5 Kerangka Alur Pemikiran

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam menganalisis data pada penelitian ini adalah:

2.5.1 Tahap *Pre-Processing* (Pendefinisian Model)

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian seluruh parameter awal yang akan digunakan dalam analisis.

1. Pendefinisian tipe elemen
Struktur dimodelkan menggunakan elemen *shell* (misalnya *SHELL181*) yang sesuai untuk analisis pelat tipis pada struktur kapal.
2. Pendefinisian sifat material
Parameter material baja dimasukkan, meliputi:
 - (1) Modulus elastisitas (E)
 - (2) Rasio Poisson (ν)
 - (3) Tegangan luluh (σ_y)
3. Pembuatan geometri
Geometri struktur dibuat berdasarkan data kapal, berikut:
 - (1) Pelat dasar (*bottom plating*)
 - (2) Pelat samping (*side shell*)
 - (3) Area bilga (*radius/knuckle*)
 - (4) Elemen penegar (*stiffener*)
4. Pendefinisian ketebalan pelat
 - (1) Ketebalan pelat dan penegar diinput sebagai *real constant* atau *section data*.
 - (2) Variasi ketebalan juga dapat diterapkan untuk mensimulasikan kondisi korosi.
5. *Meshing* (Pembagian Elemen)
Model dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*finite elements*). Ukuran *mesh* diatur agar cukup halus terutama pada daerah kritis seperti sambungan dan *hard corner*.

2.5.2 Tahap *Solution* (Pembebanan dan Analisis)

Setelah model siap, dilakukan proses analisis dengan mendefinisikan kondisi pembebanan dan batasan.

1. Pemberian *boundary condition* (kondisi batas)
 - (1) Penahan (*fix/support*) pada bagian tertentu struktur.
 - (2) Simulasi kondisi tumpuan actual kapal.
2. Pemberian beban
 Beban yang diterapkan dapat berupa:
 - (1) Tekanan hidrostatik
 - (2) Beban muatan (*cargo pressure*)
 - (3) Beban kombinasi sesuai kondisi operasi
3. Proses *Solving*
 ANSYS akan menghitung respons struktur berupa tegangan, regangan, dan deformasi berdasarkan metode elemen hingga.

2.5.3 Tahap *Post-Processing* (Analisis Hasil)

Tahap ini bertujuan untuk menginterpretasikan hasil simulasi.

1. Visualisasi hasil
 Ditampilkan dalam bentuk:
 - (1) Kontur tegangan (*stress contour*)
 - (2) Kontur deformasi (*Displacement*)
2. Identifikasi area kritis
 Area dengan tegangan maksimum (warna merah) dianalisis sebagai titik potensial kegagalan, terutama pada:
 - (1) Sambungan pelat
 - (2) Area bilga (radius)
 - (3) *Hard Corner*
3. Evaluasi kinerja struktur
 Hasil dibandingkan dengan:
 - (1) Tegangan ijin material
 - (2) Kondisi awal vs kondisi setelah diberi penambahan tebal pelat

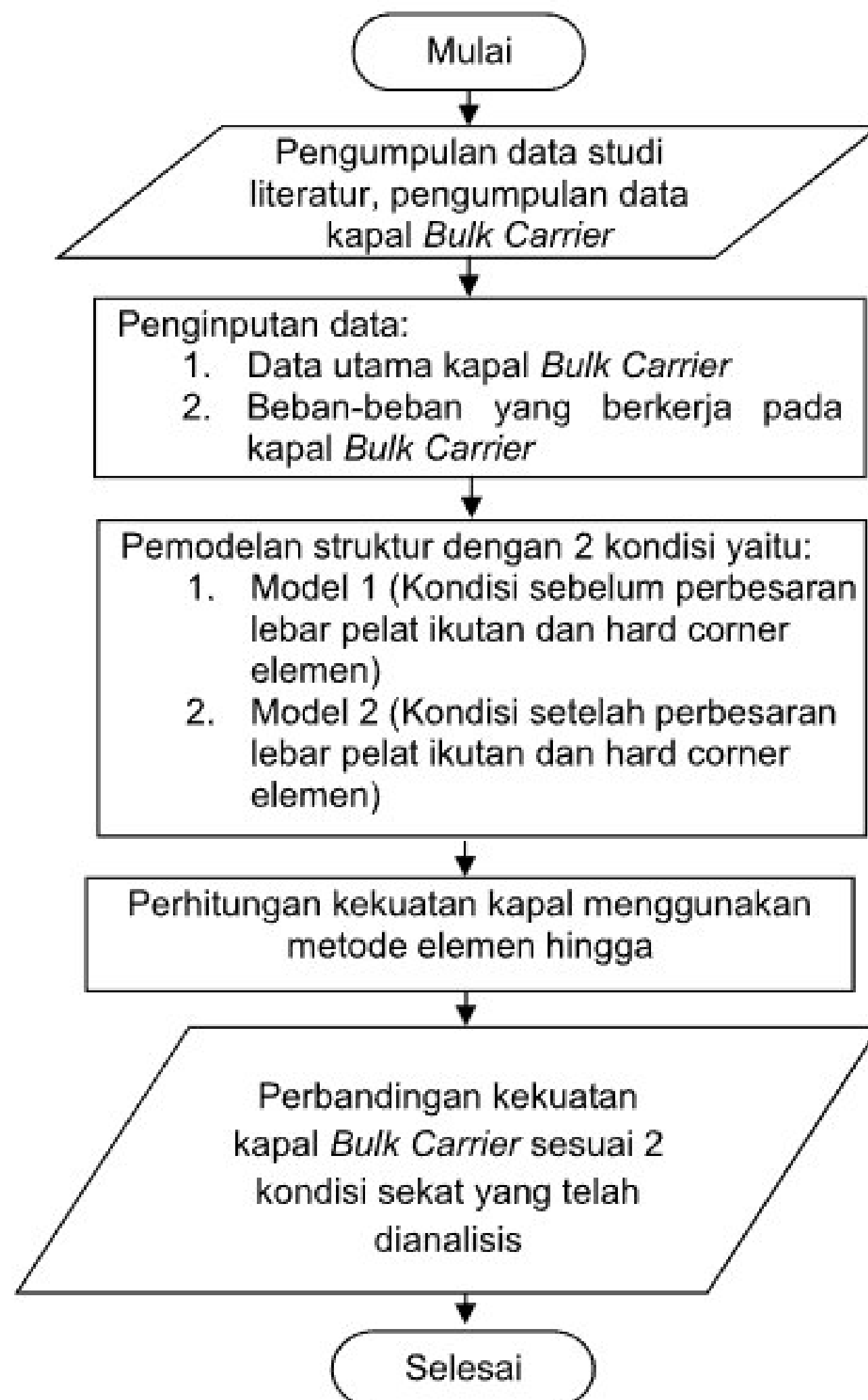
2.5.4 Validasi dan Variasi Model

Untuk meningkatkan keandalan hasil, dilakukan:

1. Studi variasi ketebalan.
2. Perbandingan hasil antar model.
3. Validasi terhadap teori atau standar desain kapal.

2.6 Diagram Alir Penelitian

Berikut di bawah ini merupakan alur penelitian.



Gambar 12 Diagram Alir Penelitian