

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. *Oil Tanker 4500 T*

Kapal *oil tanker* merupakan kapal niaga yang dirancang khusus untuk mengangkut muatan cair dalam jumlah besar dengan tingkat keselamatan struktural yang tinggi. Dari sudut pandang arsitektur kapal, *tanker* termasuk kapal dengan tuntutan kekuatan struktur yang dominan pada arah memanjang akibat distribusi muatan cair didalam tangki serta pengaruh beban gelombang selama operasi. Menurut (Lewis, 1988), struktur kapal *tanker* harus dirancang untuk mampu menahan kombinasi beban *still water* dan *wave-induced loads* yang bekerja secara kontinu sepanjang umur layan kapal. Kombinasi kedua beban tersebut menghasilkan momen lentur global yang menyebabkan badan kapal mengalami kondisi *hogging* maupun *sagging*, sehingga setiap elemen struktur harus memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk mempertahankan integritas konstruksi.



Gambar 2. 1 Kapal *Oil Tanker*
(Sumber: www.jurnalmaritim.com)

Kapasitas muatan sekitar 4500 T mengindikasikan kapal *tanker* ukuran kecil hingga menengah yang tetap tunduk pada prinsip dasar *hull girder*. *Hull girder* memodelkan badan kapal sebagai balok memanjang yang menerima momen lentur global akibat kondisi *hogging* dan *sagging*. Berdasarkan pendekatan tersebut, geladak (*deck*) dan dasar kapal (*bottom structure*) berfungsi sebagai elemen utama yang menahan tegangan tarik dan tekan akibat momen lentur, sedangkan *bulkhead*, *girder*, *stiffener*, dan struktur pendukung

lainnya berperan dalam menjaga kekakuan penampang serta mendistribusikan beban ke seluruh bagian struktur kapal (Rawson & Tupper, 2001). Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik struktur kapal *tanker* menjadi dasar penting dalam analisis kekuatan memanjang.

2.1.2. *Corrugated Bulkhead*

Corrugated bulkhead merupakan sekat kedap air yang dibentuk dari pelat bergelombang dan banyak digunakan pada kapal *tanker* serta *bulk carrier*. *Corrugated bulkhead* tidak hanya berfungsi sebagai sekat pemisah antar tangki muatan, tetapi juga sebagai elemen struktural yang meningkatkan kekakuan penampang memanjang melalui bentuk gelombangnya. Bentuk gelombang pada pelat memungkinkan sekat berfungsi sebagai elemen struktural mandiri tanpa penegar tambahan, sehingga memberikan efisiensi ruang dan kemudahan perawatan. Dibandingkan sekat datar berpenegar, *corrugated bulkhead* lebih mudah dibersihkan dan memiliki risiko korosi yang lebih rendah karena minimnya elemen struktural tambahan yang berpotensi menjadi perangkap residu muatan (Eyres & Bruce, 2012).



Gambar 2. 2 *Corrugated Bulkhead*
(Sumber: Penulis, 2025)

Dari sudut pandang mekanika struktur, *corrugated bulkhead* memiliki kekakuan lentur dan geser lebih tinggi akibat peningkatan momen inersia penampang yang dihasilkan oleh bentuk gelombang. Menurut Hughes & Paik, konfigurasi corrugation bekerja menyerupai rangka kontinu yang terintegrasi di dalam pelat, sehingga distribusi tegangan menjadi lebih merata dan konsentrasi tegangan lokal dapat ditekan. Karakteristik ini menjadikan *corrugated bulkhead* sangat efektif dalam menahan beban lateral, khususnya tekanan hidrostatik dari muatan cair.

Kajian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa *corrugated bulkhead* memiliki kapasitas ultimit yang lebih besar dibandingkan *plane bulkhead* berpenegar dengan berat material yang sama. Mekanisme keruntuhan umumnya ditandai oleh terbentuknya sendi plastis pada lipatan *corrugation*, yang menunjukkan bahwa deformasi plastis terjadi secara bertahap dan terdistribusi. Perilaku ini mencerminkan daktilitas struktural yang baik dan kemampuan menyerap energi sebelum terjadinya kegagalan total (Cui & Wang, 2024).

Selain kekuatan ultimit, *corrugated bulkhead* juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap fenomena *buckling*. Parameter geometris seperti sudut *corrugation*, kedalaman gelombang, dan ketebalan pelat berpengaruh signifikan terhadap tegangan kritis *buckling*. Meskipun demikian, interaksi kompleks antara tegangan lentur, geser, dan membran pada struktur bergelombang menuntut pemahaman teori struktur yang kuat serta analisis lanjutan memastikan kinerja struktur tetap aman pada kondisi pembebanan ekstrem (Zahir et al., 2022).

2.1.3. Penguat *Intercostal*

Penguat *intercostal* merupakan elemen struktur sekunder pada konstruksi kapal yang dipasang secara terputus di antara elemen struktur utama, seperti girder memanjang dan melintang. Fungsi utama penguat *intercostal* adalah meningkatkan kekakuan lokal panel pelat atau sekat, memperpendek bentang efektif struktur, serta mengendalikan distribusi tegangan akibat beban tekan dan lentur. Menurut (Hughes & Paik, 2010), elemen penguat diskontinu ini berperan penting dalam menahan instabilitas lokal, khususnya *buckling* elastis dan plastis yang sering terjadi sebelum struktur mencapai kapasitas ultimitnya. Dengan demikian, penguat *intercostal* dipandang sebagai komponen strategis dalam sistem struktur kapal untuk meningkatkan ketahanan lokal tanpa harus menambah ketebalan pelat secara signifikan.

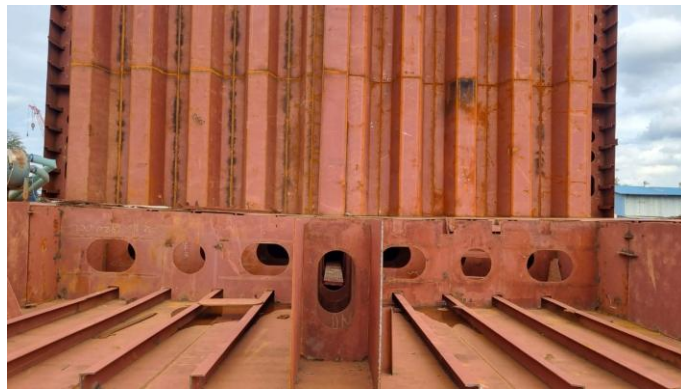
Keberadaan penguat *intercostal* dalam sudut pandang mekanika struktur, yaitu dengan memodifikasi kondisi batas pelat dengan cara membagi panel menjadi segmen-segmen yang lebih pendek sehingga meningkatkan beban kritis *buckling*. (Lewis, 1988) menyatakan bahwa peningkatan kekakuan lokal melalui penguatan sekunder secara langsung berkontribusi terhadap stabilitas struktur yang bekerja dibawah kombinasi beban tekan dan lentur. Selain itu, penguat *intercostal* juga berfungsi sebagai jalur redistribusi gaya yang memungkinkan tegangan tidak terkonsentrasi pada satu titik tertentu, melainkan tersebar secara lebih merata pada elemen struktur.

Penguat *intercostal* dipertimbangkan sebagai Solusi efisien dalam desain dan evaluasi struktur kapal untuk mengontrol deformasi

dan tegangan lokal, terutama pada struktur tipis yang rentan terhadap kegagalan awal. *Common Structural Rules for Bulk Carrier and Oil Tankers* menegaskan bahwa penguatan lokal seperti penguat intercostal diperbolehkan dan direkomendasikan selama kontribusinya terhadap respons struktur dapat dipertanggungjawabkan secara mekanis (IACS, 2024).

2.1.4. *Double Girder*

Double girder merupakan konfigurasi elemen struktural memanjang yang terdiri dari dua balok utama sejajar yang bekerja secara simultan sebagai bagian dari sistem pemikul beban global kapal. Menurut teori struktur kapal, girder memanjang berfungsi sebagai elemen utama penahan momen lentur akibat beban *longitudinal*, sehingga kontribusinya sangat dominan terhadap kekakuan lentur dan modulus penampang badan kapal. Hughes & Paik menjelaskan bahwa *girder* memanjang merupakan komponen esensial dalam pembentukan perilaku *hull girder*, karena elemen ini menyalurkan tegangan tarik dan tekan akibat kondisi *hogging* dan *sagging* secara kontinu sepanjang panjang kapal. Dengan konfigurasi ganda, nilai momen inersia penampang meningkat secara signifikan, yang secara teoritis akan menurunkan tingkat tegangan lentur maksimum pada struktur memanjang.



Gambar 2. 3 *Double Girder*
(Sumber: Penulis, 2025)

Keberadaan *double girder* dalam sudut pandang mekanika struktur berperan untuk mengubah distribusi tegangan serta deformasi memanjang dengan meningkatkan kekakuan pada struktur kapal. (Lewis, 1988) menyatakan bahwa elemen memanjang seperti *girder* memiliki peran kunci dalam menentukan kapasitas kekuatan memanjang kapal, karena kegagalan elemen ini akan langsung berdampak pada kestabilan struktur global. (Eyres & Bruce, 2012)

juga menegaskan bahwa sistem *girder* ganda memberikan redundansi struktural yang lebih baik dibandingkan *girder* tunggal, sehingga struktur menjadi lebih toleran terhadap degradasi lokal akibat kelelahan atau korosi. Secara teoritis, hal ini menjadikan double *girder* sebagai konfigurasi yang unggul dalam menjaga kontinuitas jalur pemikul beban memanjang dan kestabilan struktur kapal secara keseluruhan.

2.1.5. *Longitudinal Strength*

Kekuatan memanjang (*longitudinal strength*) merupakan salah satu aspek paling fundamental dalam perancangan dan analisis struktur kapal, karena lambung kapal secara global dapat dimodelkan sebagai sebuah *hull girder* yang bekerja layaknya balok memanjang dengan panjang yang sangat besar dibandingkan dimensi lainnya. Dalam kondisi operasi normal, kapal senantiasa mengalami beban lentur global akibat kombinasi beban *still water* (berat sendiri kapal dan muatan) serta beban gelombang laut (*wave-induced loads*), yang secara dominan menimbulkan momen lentur memanjang dalam kondisi *hogging* dan *sagging*. Prinsip dasar analisis kekuatan memanjang berlandaskan pada teori balok elastis, di mana distribusi tegangan normal sepanjang penampang kapal sangat dipengaruhi oleh besar momen lentur dan karakteristik geometrik penampang melintang, khususnya momen inersia dan modulus penampang. Menurut Lewis dalam buku *Principles of Naval Architecture*, pendekatan *hull girder* memungkinkan evaluasi respons global struktur kapal secara efisien, namun tetap menuntut ketelitian dalam memodelkan kontribusi elemen struktural utama seperti pelat, *girder*, dan sekat terhadap kekakuan serta kekuatan total penampang. Pendekatan ini menegaskan bahwa setiap perubahan konfigurasi struktur internal, termasuk modifikasi pada *bulkhead*, berpotensi memengaruhi jalur aliran gaya dan distribusi tegangan global kapal. Rawson & Tupper juga menjelaskan bahwa perubahan konfigurasi struktur internal akan memengaruhi distribusi kekakuan, jalur aliran gaya (*load path*), serta kemampuan penampang dalam menahan momen lentur global. Oleh karena itu, setiap modifikasi pada elemen struktur, baik akibat perubahan desain maupun ketidaksempurnaan fabrikasi, berpotensi mengubah respons kekuatan memanjang kapal secara keseluruhan. Dengan demikian, evaluasi kekuatan memanjang tidak hanya mempertimbangkan besarnya pembebanan, tetapi juga bagaimana beban tersebut didistribusikan melalui interaksi antar elemen struktur yang membentuk sistem *hull girder*.

Seiring berkembangnya kebutuhan keselamatan dan efisiensi struktur, konsep kekuatan memanjang tidak lagi terbatas pada analisis elastis semata, melainkan telah bergeser menuju evaluasi kekuatan ultimit (*ultimate longitudinal strength*) yang mempertimbangkan

perilaku nonlinier material dan ketidakstabilan struktur seperti *buckling* dan *plastic collapse*. Studi eksperimental dan numerik oleh (Deng et al., 2022) menunjukkan bahwa pada kondisi momen lentur ekstrem, kegagalan *hull girder* tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan melalui proses progresif yang melibatkan akumulasi deformasi plastis dan penjarangan tekuk lokal pada elemen struktur utama. Temuan ini diperkuat oleh pendekatan numerik modern berbasis *Finite Element Method* (FEM), yang memungkinkan pemodelan interaksi kompleks antara elemen pelat dan penegar dalam memikul beban memanjang secara simultan. Putranto et al. menegaskan bahwa kontribusi setiap elemen struktural terhadap kekuatan memanjang sangat bergantung pada kekakuan efektifnya, sehingga modifikasi struktur internal dapat meningkatkan atau justru mengubah mekanisme keruntuhan global apabila tidak dirancang secara optimal. Dengan demikian, kekuatan memanjang harus dipahami secara kritis sebagai hasil interaksi antara geometri, material, dan konfigurasi struktur, bukan sekadar hasil perhitungan statis berbasis teori balok klasik.

2.1.6. Tegangan

Tegangan (*stress*) merupakan respons internal material akibat pembebanan eksternal dan menjadi parameter utama dalam evaluasi kekuatan struktur kapal. Hughes & Paik menjelaskan bahwa distribusi tegangan pada struktur kapal sangat dipengaruhi oleh kekakuan struktural, kontinuitas penampang, serta jalur distribusi gaya (*load path*), sehingga setiap perubahan geometri atau kekakuan struktur akan secara langsung mengubah pola tegangan internal. Pada struktur kapal, tegangan timbul akibat kombinasi beban memanjang, tekanan hidrostatis, beban muatan, serta interaksi antar elemen struktur yang bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, analisis distribusi tegangan menjadi salah satu dasar dalam mengevaluasi kemampuan struktur untuk menahan beban operasi tanpa mengalami deformasi permanen maupun kegagalan. Secara matematis, tegangan dinyatakan sebagai:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1.)$$

Dimana:

- σ adalah tegangan normal (normal stress) dalam satuan *Pa* atau *MPa*,
- F adalah gaya internal dalam satuan *N*, dan
- A adalah luas penampang material dalam satuan *m*².

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya tegangan dipengaruhi oleh gaya yang bekerja dan luas penampang yang menahannya. Namun, pada struktur kapal yang memiliki konfigurasi kompleks seperti *corrugated bulkhead*, kondisi tegangan yang terjadi

umumnya merupakan kombinasi tegangan tarik, tekan, dan geser yang bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, evaluasi kekuatan struktur tidak cukup hanya menggunakan tegangan normal, tetapi memerlukan parameter yang mampu merepresentasikan keadaan tegangan multiaxial.

Dalam analisis struktur kapal berbahan baja, *RINA Rules* menetapkan bahwa evaluasi tegangan dilakukan menggunakan tegangan ekuivalen *Von Mises*, karena mampu merepresentasikan kondisi tegangan multiaxial yang umum terjadi pada struktur tipis seperti *corrugated bulkhead*. Pendekatan ini juga sejalan dengan teori plastisitas untuk material isotropik.

Secara teoritis, tegangan ekuivalen *Von Mises* dirumuskan sebagai:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.2.)$$

Menurut *RINA Rules*, nilai σ_{vm} yang terjadi pada struktur harus lebih kecil dari tegangan ijin material untuk menjamin keamanan struktur. Tegangan ijin umumnya diturunkan dari tegangan leleh material (σ_y) dengan faktor reduksi tertentu sesuai jenis struktur dan kondisi pembebanan.

Dalam penelitian ini, tegangan didefinisikan secara operasional sebagai tegangan *Von Mises* maksimum yang diperoleh dari hasil analisis *FEM* pada area *corrugated bulkhead* dan sambungannya dengan *double girder*. Dimensi variabel ini mencakup:

- distribusi tegangan,
- nilai tegangan maksimum ($\sigma_{vm,max}$).

Indikator utama yang digunakan adalah perubahan $\sigma_{vm,max}$ akibat *misalignment double girder* serta penurunan tegangan setelah penambahan *flat bar intercostal*, yang secara langsung mencerminkan efektivitas penguatan struktural.

2.1.7. Deformasi

Deformasi (*deformation*) didefinisikan sebagai perubahan bentuk atau dimensi suatu struktur akibat pengaruh gaya luar, momen, maupun kombinasi pembebanan yang bekerja. Deformasi merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi perilaku mekanis suatu struktur karena menggambarkan kemampuan struktur dalam mempertahankan bentuk dan kekakuannya ketika menerima beban. Perubahan bentuk tersebut terjadi sebagai respons material terhadap tegangan internal yang timbul akibat pembebanan, dengan asumsi bahwa material masih berada pada daerah elastis selama tegangan yang terjadi belum melampaui batas leleh. Pada struktur kapal yang

didominasi oleh elemen pelat berdinding tipis, deformasi dapat terjadi secara global pada keseluruhan penampang maupun secara lokal pada daerah-daerah yang mengalami konsentrasi tegangan. Besarnya deformasi dipengaruhi oleh karakteristik material, kekakuan struktur, konfigurasi geometri, kondisi batas, serta mekanisme distribusi beban antar elemen struktur. Menurut Pytel & Kiusalaas menekankan bahwa deformasi yang berlebihan dapat menurunkan kinerja dan keselamatan struktur meskipun tegangan maksimum masih di bawah batas izin sehingga analisis deformasi menjadi aspek fundamental dalam penilaian kekakuan dan stabilitas struktur secara keseluruhan.

Secara teoritis, deformasi aksial suatu elemen struktur elastis dengan panjang awal L yang menerima gaya aksial P dinyatakan sebagai perubahan panjang δ yang dirumuskan dengan persamaan.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (2.3.)$$

di mana

- δ adalah deformasi aksial (mm atau m);
- P adalah gaya aksial (N);
- L adalah panjang elemen (mm atau m);
- A adalah luas penampang (mm² atau m²);
- E adalah modulus elastisitas material (MPa atau Pa).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa deformasi berbanding lurus terhadap besar gaya dan panjang elemen, tetapi berbanding terbalik terhadap luas penampang serta modulus elastisitas material. Semakin besar kekakuan aksial AE , maka deformasi yang terjadi akan semakin kecil.

Untuk struktur yang mengalami pembebanan lentur, deformasi transversal dinyatakan melalui persamaan diferensial garis elastik.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.4.)$$

dengan

- v sebagai defleksi,
- $M(x)$ sebagai momen lentur, dan
- I sebagai momen inersia penampang.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa deformasi lentur berbanding terbalik dengan kekakuan lentur EI . Oleh karena itu, peningkatan kekakuan struktur, baik melalui penambahan dimensi penampang maupun elemen penguat, akan secara langsung menurunkan besarnya deformasi yang terjadi. Dalam struktur kapal, peningkatan kekakuan ini menjadi salah satu strategi utama untuk mempertahankan kekuatan memanjang dan mengurangi risiko ketidakstabilan struktur.

Dalam analisis numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM), deformasi umumnya direpresentasikan sebagai total displacement (U Magnitude) yang menunjukkan perpindahan total setiap titik struktur akibat pembebanan. Distribusi deformasi memberikan informasi mengenai bagian struktur yang mengalami perpindahan terbesar sekaligus memperlihatkan efektivitas sistem struktur dalam mendistribusikan beban.

2.1.8. *Safety Factor*

Faktor keamanan (*safety factor*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan suatu struktur terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan akibat pembebanan. Dalam analisis struktur kapal, faktor keamanan menunjukkan besarnya cadangan kekuatan (*strength reserve*) yang masih dimiliki struktur terhadap kondisi kerja aktual. Evaluasi faktor keamanan dilakukan dengan membandingkan kapasitas material terhadap tegangan yang dihasilkan dari analisis numerik. Menurut RINA Rules for the Classification of Ships struktur kapal dinyatakan memenuhi persyaratan apabila tegangan kerja tidak melebihi tegangan izin yang ditentukan berdasarkan karakteristik material dan faktor keselamatan yang digunakan dalam proses desain.

Dalam penelitian ini, faktor keamanan dihitung menggunakan pendekatan umum yang banyak diterapkan pada analisis *Finite Element Method* (FEM), yaitu:

$$SF = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{vm,max}} \quad (2.5.)$$

dengan:

- σ_{allow} = tegangan ijin material (allowable stress),
- $\sigma_{vm,max}$ = tegangan *Von Mises* maksimum hasil analisis.

Untuk baja struktur kapal, *RINA Rules* menyatakan bahwa tegangan ijin dapat dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan leleh material:

$$\sigma_{allow} = \frac{\sigma_y}{\gamma_m} \quad (2.6.)$$

di mana:

- σ_y = tegangan leleh material,
- γ_m = faktor material (*material partial safety factor*) sesuai ketentuan klasifikasi.

Untuk material *Marine Steel Grade A*, tegangan leleh yang digunakan dalam penelitian ini adalah 235 MPa. Apabila digunakan faktor material $\gamma_m = 1,0$ sebagaimana diterapkan pada evaluasi kekuatan berdasarkan *RINA Rules* untuk analisis tegangan elastis, maka tegangan izin material menjadi sebesar **235 MPa**.

Nilai faktor keamanan diinterpretasikan berdasarkan kriteria berikut.

- $SF > 1$, struktur masih berada pada kondisi aman karena tegangan kerja lebih kecil daripada tegangan izin.
- $SF = 1$, struktur berada pada batas tegangan izin.
- $SF < 1$, struktur tidak memenuhi persyaratan kekuatan karena tegangan kerja telah melampaui tegangan izin. Dalam penelitian ini, faktor keamanan digunakan sebagai indikator kinerja utama untuk membandingkan kondisi struktur:

Dalam penelitian ini, faktor keamanan digunakan sebagai salah satu parameter utama untuk membandingkan kinerja struktur **corrugated bulkhead** pada dua kondisi, yaitu:

1. tanpa *flat bar intercostal*, dan
2. dengan *flat bar intercostal*.

Peningkatan nilai faktor keamanan setelah penambahan penguat menunjukkan bahwa modifikasi struktur mampu mengurangi konsentrasi tegangan, meningkatkan kekakuan lokal, serta memperbaiki kemampuan struktur dalam menahan beban memanjang akibat kondisi *misalignment double girder*.

2.1.9. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan teknik yang dikendalikan oleh persamaan diferensial parsial. FEM telah diterapkan secara luas pada bidang mekanika struktur, mekanika padat, perpindahan panas, mekanika fluida, hingga analisis multifisika karena mampu menangani permasalahan dengan geometri yang kompleks dan kondisi batas

yang bervariasi. Dalam bidang mekanika struktur, FEM digunakan untuk menganalisis respons struktur terhadap pembebanan statik maupun dinamik, meliputi distribusi tegangan, regangan, deformasi, stabilitas struktur, serta perilaku keruntuhan material. Selain itu, metode ini juga digunakan pada analisis konduksi panas, difusi massa, medan elektromagnetik, dan interaksi fluida-struktur. Fleksibilitas FEM terletak pada kemampuannya menangani geometri kompleks, kondisi batas yang tidak seragam, serta sifat material yang beragam, yang sulit atau bahkan tidak mungkin diselesaikan menggunakan metode analitik klasik (Zienkiewicz & Taylor, 2000). Oleh karena itu, FEM berkembang menjadi metode numerik yang paling banyak digunakan dalam rekayasa modern untuk mendukung proses desain, optimasi, evaluasi kekuatan, dan analisis perilaku struktur.

Pembuatan model FEM dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan. Tahap pertama adalah idealisasi permasalahan fisik menjadi model matematis dengan menetapkan geometri, sifat material, kondisi batas (*boundary condition*), jenis pembebanan, serta asumsi yang digunakan selama analisis. Selanjutnya, domain kontinu didiskretisasi menjadi sejumlah elemen hingga yang saling terhubung melalui simpul (*nodes*) dalam proses yang dikenal sebagai *meshing*. Pada setiap elemen ditetapkan fungsi bentuk untuk mengaproksimasi medan perpindahan atau variabel utama lainnya. Fungsi interpolasi ini kemudian diturunkan matriks kekakuan elemen, yang selanjutnya dirakit menjadi matriks kekakuan global berdasarkan prinsip kesetimbangan dan kompatibilitas (Logan, 2017). Setelah kondisi batas diterapkan, sistem persamaan tersebut diselesaikan secara numerik untuk memperoleh perpindahan nodal sebagai solusi utama, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung regangan, tegangan, gaya reaksi, maupun parameter lainnya. Akurasi hasil analisis sangat dipengaruhi oleh kualitas mesh, jenis elemen, ukuran elemen, serta kesesuaian asumsi teoritis dengan kondisi fisik yang dimodelkan. Oleh karena itu, studi konvergensi mesh menjadi tahapan penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi telah mencapai tingkat akurasi yang memadai.

Hasil analisis menggunakan FEM dapat berupa berbagai parameter respons struktur sesuai dengan tujuan analisis. Pada analisis struktur kapal, keluaran utama yang diperoleh meliputi perpindahan nodal (*nodal displacement*), regangan, tegangan, reaksi tumpuan, serta distribusi deformasi pada seluruh model. Selain parameter dasar tersebut, FEM juga mampu menghasilkan besaran turunan seperti tegangan ekuivalen Von Mises, faktor keamanan (*safety factor*), energi regangan, hingga karakteristik dinamis berupa frekuensi alami dan bentuk mode getar apabila dilakukan analisis dinamik. Meskipun FEM mampu menyajikan distribusi medan

tegangan dan deformasi secara detail melalui visualisasi kontur, hasil yang diperoleh tetap merupakan solusi numerik yang bersifat aproksimasi. Oleh karena itu, interpretasi hasil simulasi harus memperhatikan kualitas mesh, konvergensi solusi, validitas kondisi batas, serta kesesuaiannya dengan teori mekanika dan perilaku material yang digunakan (Zienkiewicz & Taylor, 2000). Dengan demikian, keandalan hasil FEM tidak hanya bergantung pada perangkat lunak yang digunakan, tetapi juga pada kualitas pemodelan yang dilakukan oleh peneliti.

2.2. Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Deng et al. (2022) bertujuan untuk menganalisis perilaku keruntuhan struktur *box type hull girder* akibat pembebanan lentur ultimit yang terjadi secara siklik. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dipadukan dengan simulasi numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) nonlinier. Variabel yang dianalisis meliputi tipe hull (*single hull* dan *double hull*), pembebanan lentur siklik, deformasi plastis, serta fenomena *buckling* progresif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur *hull girder* mengalami akumulasi deformasi plastis dan *buckling* secara bertahap selama pembebanan berulang hingga mencapai kondisi ultimit. Selain itu, konfigurasi *double hull* memiliki kapasitas kekuatan ultimit dan stabilitas struktur yang lebih tinggi dibandingkan *single hull*, sehingga lebih mampu mempertahankan integritas struktur terhadap beban lentur berulang. Temuan ini menunjukkan pentingnya peningkatan kekakuan struktur dalam mempertahankan kekuatan memanjang kapal.

Penelitian Putranto et al. (2022) mengembangkan pendekatan *Equivalent Single Layer* (ESL) untuk menganalisis kekuatan ultimit *ship hull girder* secara lebih efisien. Metode penelitian menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* dengan model ESL yang dibandingkan terhadap model FEM tiga dimensi. Variabel penelitian meliputi momen lentur memanjang, distribusi tegangan pada penampang, serta kondisi struktur utuh (*intact hull*) dan struktur mengalami kerusakan (*damaged hull*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ESL mampu memprediksi kekuatan ultimit hull girder dengan tingkat akurasi yang sangat mendekati model FEM tiga dimensi, sekaligus mengurangi waktu komputasi hingga sekitar tiga kali lipat. Penelitian ini membuktikan bahwa metode numerik berbasis FEM merupakan pendekatan yang andal untuk mengevaluasi kekuatan memanjang struktur kapal secara efisien.

Penelitian Cui & Wang (2024) bertujuan membandingkan perilaku struktur *corrugated bulkhead* dan *plane bulkhead* terhadap pembebanan tekanan lateral. Penelitian dilakukan melalui kombinasi pengujian eksperimental menggunakan tekanan udara dan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* nonlinier. Variabel yang dianalisis meliputi tipe *bulkhead*, tekanan lateral, kapasitas ultimit, dan mekanisme keruntuhan

struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *corrugated bulkhead* memiliki kapasitas ultimit yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan *plane bulkhead* meskipun menggunakan berat material yang sama. Mekanisme keruntuhan pada *corrugated bulkhead* ditandai dengan terbentuknya sendi plastis pada lipatan *corrugation* yang memungkinkan struktur mengalami deformasi secara bertahap sebelum mengalami kegagalan total. Hasil tersebut menunjukkan bahwa bentuk *corrugation* mampu meningkatkan kekakuan dan kapasitas beban struktur kapal.

Penelitian Zahir et al. (2022) membahas pengaruh parameter geometri terhadap perilaku *transverse corrugated bulkhead* kapal *tanker* ketika menerima beban *buckling*. Metode penelitian menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan analisis *buckling* numerik. Variabel yang dikaji meliputi sudut *corrugation*, ketebalan pelat, tegangan kritis *buckling*, dan berat konstruksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut *corrugation* dan ketebalan pelat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas struktur. Model dengan sudut *corrugation* yang lebih kecil dan pelat yang lebih tebal menghasilkan tegangan kritis *buckling* yang lebih tinggi sehingga memiliki tingkat stabilitas terbaik. Penelitian ini menegaskan bahwa perubahan konfigurasi geometri *corrugated bulkhead* berpengaruh langsung terhadap kekuatan struktur kapal.

Penelitian Mahzumah Cindy et al. (2025) bertujuan menganalisis kapasitas geser *double corrugated web girder* menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method*. Variabel yang dianalisis meliputi sudut *corrugation*, ketebalan web, kapasitas geser, serta defleksi struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *double corrugated web* dengan konfigurasi sudut *corrugation* yang optimum mampu meningkatkan kapasitas beban geser sekaligus menurunkan defleksi struktur secara signifikan. Temuan tersebut membuktikan bahwa modifikasi geometri *corrugated* dapat meningkatkan kekakuan struktur dan memperbaiki distribusi gaya pada elemen yang menerima pembebanan, sehingga memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem penguatan pada struktur kapal.

Halaman ini sengaja dikosongkan