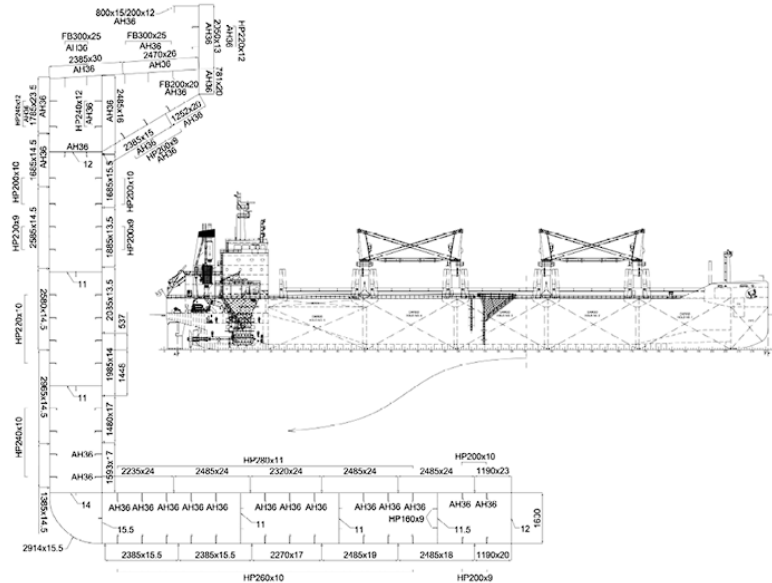


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Midship Kapal *Bulk Carrier*



Gambar 2.1 *Midship* Kapal *Bulk Carrier* (Sumber : Penulis 2026)

Midship pada kapal *bulk carrier* adalah bagian tengah lambung kapal yang memiliki peran penting dalam menahan beban utama kapal serta menjaga kekuatan struktur secara keseluruhan. Jika dilihat dari sudut pandang korosi, midship merupakan area yang sangat rentan mengalami kerusakan material karena terus menerus terpapar lingkungan laut yang bersifat korosif, seperti air laut, oksigen, dan kelembaban tinggi. Selain itu, bagian dalam midship yang berfungsi sebagai ruang muat juga dapat mempercepat proses korosi akibat sisa muatan curah yang bersifat lembab atau mengandung zat kimia tertentu (Kovač et al., 2024a).

Korosi yang sering terjadi pada bagian midship adalah *uniform corrosion* atau korosi merata, yaitu penipisan material yang terjadi secara perlahan dan menyebar pada permukaan pelat baja. Penurunan ketebalan pelat akibat korosi ini dapat mengurangi kekuatan struktur dalam menahan beban, terutama beban lentur kapal yang umumnya paling besar terjadi di area tengah kapal. Oleh karena itu, midship sering menjadi fokus utama dalam analisis kekuatan struktur dan evaluasi sisa umur pakai kapal, termasuk dalam penelitian yang menggunakan metode *Finite Element Analysis* untuk menilai perubahan perilaku tegangan, deformasi, dan *Ultimate Strength* akibat pengaruh korosi (Woloszyk & Garbatov, 2022).

2.1.1 Material AH 36

Material AH36 merupakan salah satu jenis baja struktural yang banyak digunakan dalam konstruksi kapal, khususnya pada bagian lambung kapal seperti deck, side shell, bottom, dan struktur midship. Baja ini termasuk dalam kategori *high strength shipbuilding steel* yang memiliki kekuatan lebih tinggi dibandingkan baja kapal biasa. Material AH36 memiliki yield strength minimum sekitar 355 MPa dan tensile strength berkisar antara 490–620 MPa, sehingga mampu menahan berbagai beban yang bekerja pada kapal, seperti beban muatan, tekanan air laut, serta beban gelombang. Selain itu, baja AH36 memiliki sifat ketangguhan (*toughness*) dan keuletan (*ductility*) yang baik, serta mudah dilas sehingga sangat cocok digunakan dalam proses pembangunan kapal. Standar material ini juga diakui oleh organisasi klasifikasi kapal seperti *International Association of Classification Societies* yang menetapkan spesifikasi material untuk menjamin kekuatan dan keselamatan struktur kapal. Oleh karena itu, material AH36 sering digunakan dalam analisis struktur kapal, termasuk dalam penelitian yang menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengetahui perilaku tegangan, deformasi, dan *ultimate strength* pada struktur kapal.

Tabel 2.1 Spesifikasi material AH36

Properti	Nilai
Yield Strength	≥ 355 MPa
Tensile Strength (F_u)	490–620 MPa
Elongation	≥ 20 –21%
Modulus Elastisitas (E)	± 200 GPa
Poisson Ratio (ν)	$\pm 0,30$
Densitas	± 7.850 kg/m ³

2.2 Ultimate Strength

Ultimate Strength adalah kemampuan maksimum suatu struktur kapal dalam menahan beban sebelum mengalami kegagalan atau keruntuhan. Pada struktur lambung kapal, nilai *Ultimate Strength* menunjukkan batas terakhir kekuatan ketika menerima beban besar seperti muatan, tekanan air laut, dan gelombang. Selama beban masih di bawah batas tersebut, struktur masih mampu bekerja dengan aman, namun ketika beban mendekati batas *Ultimate Strength*, struktur mulai mengalami deformasi permanen, tekuk (*buckling*), hingga akhirnya kehilangan kekuatan (Tekgoz & Garbatov, 2021).

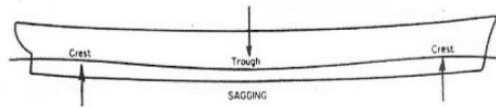
Keberadaan *Uniform Corrosion* dapat menurunkan nilai *Ultimate Strength* karena korosi merata menyebabkan berkurangnya ketebalan pelat secara keseluruhan. Penipisan material ini membuat struktur menjadi lebih lemah dan mudah mengalami deformasi saat menerima beban. Akibatnya, kemampuan maksimum struktur dalam menahan beban juga menurun, sehingga analisis *ultimate strength* sangat penting untuk mengetahui seberapa besar pengaruh *uniform corrosion* terhadap keamanan dan keandalan struktur kapal (Tekgoz & Garbatov, 2021).

2.3 Sagging

Sagging adalah kondisi lenturan memanjang kapal di mana bagian tengah kapal melendut ke bawah, sedangkan haluan dan buritan relatif naik. Kondisi ini biasanya terjadi akibat distribusi muatan yang terkonsentrasi di tengah kapal atau karena pengaruh gelombang yang menopang bagian ujung kapal. Secara struktural, *Sagging* menimbulkan

momen lentur yang menyebabkan perbedaan tegangan pada elemen memanjang kapal, sehingga struktur harus bekerja menahan kombinasi beban tarik dan tekan secara bersamaan (Sujiatanti et al., 2025).

Dalam pendekatan *Ultimate Strength*, *Sagging* dipandang sebagai kondisi pembebanan ekstrem yang digunakan untuk menilai batas kemampuan maksimum struktur sebelum mengalami keruntuhan. Pada kondisi ini, geladak cenderung mengalami tegangan tekan yang berisiko menyebabkan buckling, sedangkan bagian dasar kapal mengalami tegangan tarik yang dapat memicu plastisasi atau retak. Analisis *Ultimate Strength* bertujuan mengevaluasi seberapa besar momen *Sagging* yang masih dapat ditahan struktur memanjang kapal sebelum terjadi kegagalan permanen atau kehilangan kapasitas beban (Alie et al., 2019).

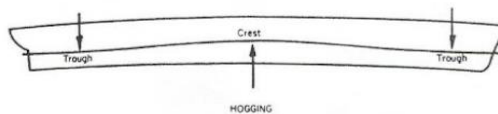


Gambar 2.2 kondisi *Sagging* (Sumber : *ReasearchGate*)

2.4 *Hogging*

Hogging adalah kondisi lenturan memanjang kapal di mana bagian tengah kapal melengkung ke atas, sedangkan haluan dan buritan relatif turun ke bawah. Kondisi ini biasanya terjadi ketika puncak gelombang berada di tengah kapal atau distribusi beban lebih besar di bagian ujung. Secara struktural, *Hogging* menghasilkan momen lentur yang menyebabkan perbedaan tegangan pada elemen memanjang kapal, sehingga struktur harus menahan kombinasi gaya tarik dan tekan yang signifikan sepanjang lambung (Salazar-Domínguez et al., 2021).

Dalam pendekatan *Ultimate Strength*, *Hogging* dipandang sebagai kondisi pembebanan ekstrem untuk mengevaluasi kapasitas maksimum struktur sebelum mengalami keruntuhan. Pada kondisi ini, geladak umumnya mengalami tegangan tarik yang berpotensi menyebabkan plastisasi atau retak, sedangkan bagian dasar kapal mengalami tegangan tekan yang berisiko mengalami buckling ketika mendekati batas kekuatan ultimit. Analisis *Ultimate Strength* digunakan untuk menilai kemampuan struktur memanjang kapal dalam menahan momen *Hogging* maksimum sebelum terjadi deformasi permanen, instabilitas pelat, atau kegagalan elemen struktur (Salazar-Domínguez et al., 2021).



Gambar 2.3 Kondisi *Hogging* (Sumber : *ResearchGate*)

2.5 *Degree of Pitting (DOP)*

Parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat keparahan korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada suatu material atau struktur. DOP dinyatakan sebagai perbandingan antara kedalaman korosi maksimum yang terjadi dengan ketebalan awal material dalam bentuk persentase. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan besarnya kerusakan lokal akibat terbentuknya pit pada permukaan material yang terpapar lingkungan korosif. Berbeda dengan korosi merata yang menyebabkan pengurangan

ketebalan secara seragam, pitting corrosion menghasilkan kehilangan material yang terlokalisasi sehingga dapat menimbulkan konsentrasi tegangan yang tinggi pada area tertentu (van Gaalen et al., 2022)

DOP sering digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kondisi struktur yang mengalami degradasi akibat korosi. Peningkatan nilai DOP menunjukkan semakin dalamnya pit yang terbentuk, sehingga dapat mengurangi luas penampang efektif dan menurunkan kemampuan struktur dalam menahan beban. Oleh karena itu, parameter ini banyak diterapkan dalam analisis numerik maupun eksperimental untuk menilai pengaruh korosi terhadap kekuatan sisa, respons struktur, serta kapasitas ultimit yang dimiliki suatu konstruksi selama masa operasinya (Wang et al., n.d.)

2.6 Degree of Corrosion (DOC)

Parameter yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kerusakan atau degradasi material akibat proses korosi. DOC menunjukkan seberapa besar bagian material yang telah mengalami kehilangan massa, ketebalan, atau luas penampang karena reaksi korosi yang terjadi selama masa operasi. Parameter ini sering digunakan sebagai indikator untuk menilai kondisi struktur dan tingkat keparahan korosi yang dialami suatu komponen, sehingga dapat membantu dalam evaluasi integritas serta umur layan struktur (Kovač et al., 2024b)

DOC digunakan untuk mengukur pengaruh korosi terhadap kekuatan dan kinerja struktur. Semakin tinggi nilai DOC, semakin besar tingkat kerusakan yang terjadi pada material, yang dapat menyebabkan penurunan kapasitas beban, peningkatan konsentrasi tegangan, dan berkurangnya keamanan struktur. Oleh karena itu, DOC menjadi salah satu parameter penting dalam analisis kekuatan sisa, perencanaan perawatan, serta pemodelan numerik untuk memprediksi dampak korosi terhadap perilaku struktur selama masa layannya (Kim et al., 2023)

2.7 Studi Numerik

Studi numerik secara umum merupakan pendekatan komputasi yang menggunakan algoritma matematis aproksimasi untuk menyelesaikan persamaan kompleks yang tidak dapat dipecahkan secara analitik eksak. Metode ini mengubah masalah kontinyu menjadi diskrit melalui iterasi berulang operasi aritmatika (tambah, kurang, kali, bagi) dengan bantuan komputer, menghasilkan solusi numerik yang mendekati nilai sebenarnya melalui konvergensi bertahap (Chen et al., 2024).

Dalam ilmu teknik dan sains, studi numerik mencakup *Finite Element Method*, *Finite Difference Method*, dan *Monte Carlo simulation* untuk memodelkan fenomena fisik seperti distribusi tegangan pada rel *slipway* atau aliran fluida. Keunggulannya terletak pada kemampuan menangani geometri kompleks, material nonhomogen, dan beban nonlinear yang sulit dianalisis secara manual, meskipun memerlukan validasi eksperimental untuk akurasi hasil aproksimasi (Saeed & Almutairi, 2025).

2.8 Uniform Corrosion

Uniform Corrosion (korosi merata) adalah jenis korosi yang terjadi secara menyeluruh dan merata pada permukaan material logam. Pada kondisi ini, penurunan ketebalan material terjadi secara perlahan di seluruh area yang terpapar lingkungan korosif, seperti air laut, udara lembap, atau zat kimia tertentu. Karena terjadi secara seragam, permukaan material biasanya terlihat menipis secara umum tanpa lubang atau kerusakan lokal yang tajam (Refait et al., 2020).

Dalam struktur kapal, *Uniform Corrosion* sering terjadi pada pelat lambung yang terus menerus bersentuhan dengan air laut. Meskipun terlihat sederhana, korosi

jenis ini dapat menurunkan kekuatan struktur secara signifikan karena mengurangi ketebalan efektif pelat. Penipisan yang terus berlangsung dapat menyebabkan struktur menjadi lebih mudah mengalami deformasi, penurunan kekuatan, hingga berisiko gagal saat menerima beban besar (Woloszyk & Garbatov, 2022c).

$$\Delta V = DOP \cdot DOC$$

$$t_{corr} = t (1 - \Delta V)$$

$$\phi_{ult, pit} = \phi_u (\beta) [1 - 1.5 DOP DOC]$$

2.8.1 Faktor korosi

Korosi pada lambung kapal adalah proses penurunan kualitas atau kerusakan material logam yang terjadi akibat reaksi kimia antara baja kapal dengan lingkungan air laut. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan lambung kapal mengalami korosi.

Tabel 2.2 Faktor Korosi

1	Air laut	Kandungan garam ini membuat lingkungan laut menjadi sangat agresif terhadap material logam sehingga lambung kapal mudah mengalami korosi.
2	Oksigen	Oksigen yang terlarut di dalam air laut berperan dalam proses oksidasi logam.
3	Coating	Lambung kapal biasanya dilapisi cat pelindung untuk mencegah kontak langsung antara baja dan air laut. Jika lapisan ini rusak, retak, atau terkelupas akibat benturan, abrasi, atau umur pemakaian, maka bagian baja akan langsung terpapar lingkungan laut dan memicu korosi.
4	Perubahan suhu dan kelembapan	Perbedaan suhu dan tingkat kelembapan di lingkungan laut dapat mempercepat reaksi kimia yang menyebabkan oksidasi pada logam.
5	Pengelasan	Pengelasan dapat menyebabkan terjadinya korosi karena proses ini mengubah sifat fisik dan kimia pada material di sekitar daerah las.

2.9 Finite Element Analysis

Finite Element Analysis (FEA) merupakan metode numerik yang digunakan untuk memprediksi perilaku sistem fisik kompleks dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil (mesh) yang saling terhubung pada titik node. Pendekatan ini menyelesaikan persamaan diferensial parsial melalui diskritisasi domain kontinyu menjadi sistem persamaan aljabar linear/nonlinear yang dipecahkan secara iteratif oleh komputer (Baccouch, 2021).

Proses FEA meliputi preprocessing (pemodelan geometri 3D dan definisi material), solution (analisis statis/dinamis dengan boundary conditions), dan postprocessing (visualisasi kontur tegangan, deformasi, atau aliran). Metode ini unggul untuk struktur tidak homogen dengan beban multiaxial dari tarik winch dan berat kapal, memungkinkan optimasi desain sebelum fabrikasi sambil menjaga faktor keamanan structural (Amaze et al., 2024).

2.10 Progressive Collapse Analysis

Progressive Collapse Analysis (PCA) adalah metode analisis struktur yang digunakan untuk mengetahui kekuatan maksimum suatu struktur kapal sebelum mengalami keruntuhan total. Analisis ini dilakukan dengan memberikan beban secara bertahap pada struktur, biasanya berupa momen lentur pada bagian midship, lalu diamati bagaimana elemen seperti pelat, *stiffener*, dan *girder* berubah dari kondisi

elastis, plastis, hingga akhirnya gagal atau runtuh (Probabilistic Evaluation of the Computational Uncertainty in Ultimate Ship Hull Strength Prediction, n.d.) .

PCA dipakai untuk memahami proses kerusakan struktur secara menyeluruh dan menentukan *Ultimate Strength* kapal. Metode ini penting dalam desain dan evaluasi struktur karena dapat menunjukkan bagian yang paling lemah, pengaruh korosi atau penipisan material, serta memastikan bahwa struktur kapal tetap aman sesuai standar seperti aturan IACS CSR (Ilić & Momčilović, 2023) .

2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai bahan rujukan untuk memperkuat penelitian yang dilakukan. Meskipun terdapat kesamaan variabel dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini memiliki perbedaan pada objek penelitian, metode, maupun periode waktu penelitian. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat melengkapi dan mengembangkan hasil penelitian sebelumnya. Oleh sebab itu, dalam tinjauan pustaka dicantumkan hasil dari penelitian terdahulu sebagai berikut:

Berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh korosi terhadap kekuatan struktur kapal menggunakan metode numerik maupun eksperimental. (Baihaqi, 2025) menunjukkan bahwa korosi yang disertai paparan temperatur tinggi dapat menurunkan sifat mekanik material lambung sehingga kapasitas struktur kapal ikut berkurang. Selanjutnya, (Melnyk et al., 2025) menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) untuk menganalisis penipisan pelat akibat korosi dan menemukan bahwa berkurangnya ketebalan pelat menyebabkan peningkatan displacement sehingga risiko kegagalan struktur semakin besar. Sementara itu, (Nugroho et al., 2023) melalui pengujian NDT ultrasonic dan model prediksi korosi menyimpulkan bahwa penurunan ketebalan pelat akibat korosi berdampak pada berkurangnya umur layan struktur kapal.

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa korosi berpengaruh langsung terhadap kapasitas kekuatan struktur kapal. Penelitian yang dipublikasikan dalam (Putra et al., 2025) menyatakan bahwa nilai ultimate strength dipengaruhi oleh kondisi pembebanan selama operasi serta degradasi struktur akibat umur layanan. Selain itu, (Islami et al., 2023) menemukan bahwa korosi pada material propeller menyebabkan penurunan sifat mekanik material yang beroperasi di lingkungan laut, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengevaluasi dampaknya terhadap integritas struktur kapal.

Penelitian internasional juga memperkuat temuan tersebut. (Qi et al., 2022) melaporkan bahwa general corrosion maupun non-uniform corrosion menyebabkan penurunan ultimate strength pelat lambung secara signifikan. Selain itu, (Mei et al., 2022) menunjukkan bahwa random corrosion mengurangi kapasitas ultimate pada hull girder dan stiffened plate berdasarkan analisis FEA. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa korosi merupakan faktor utama yang menyebabkan penurunan ketebalan pelat, perubahan sifat mekanik material, peningkatan deformasi, serta penurunan ultimate strength struktur kapal. Oleh karena itu, metode FEA menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mengevaluasi pengaruh korosi terhadap perilaku dan kekuatan struktur kapal secara lebih akurat.