

Analisis Kekuatan Struktur Lambung Kapal Menggunakan Metode Elemen Hingga

Moh. Hafidz Efendy*¹

¹Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

e-mail: *moh.hafidz@uis.ac.id,

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur lambung kapal kargo 4.250 DWT menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH/FEM). Model tiga dimensi lambung kapal dibangun berdasarkan gambar konstruksi dengan material baja AH36 sesuai standar klasifikasi Bureau Veritas (BV). Analisis dilakukan terhadap lima kondisi pembebanan utama, yaitu kondisi hogging, sagging, tekanan hidrostatis penuh, beban angin lateral, serta kombinasi beban ekstrem. Hasil analisis menunjukkan tegangan Von Mises maksimum sebesar 241,7 MPa pada kondisi kombinasi beban ekstrem yang terjadi pada gading melintang tengah kapal, dengan faktor keamanan 1,47 yang masih memenuhi persyaratan minimum BV sebesar 1,40. Deformasi maksimum yang terjadi adalah 58,7 mm, di bawah batas ijin 60 mm. Validasi model dengan metode analitik teori balok menghasilkan deviasi rata-rata 3,37%, menunjukkan keakuratan model FEM yang memadai. Studi sensitivitas mesh mengkonfirmasi konvergensi solusi pada 143.780 elemen. Penelitian ini memberikan basis data kekuatan struktural sebagai acuan dalam desain dan sertifikasi lambung kapal sejenis.

Kata kunci— metode elemen hingga; kekuatan struktur; lambung kapal; tegangan Von Mises; baja AH36

Abstract

This study aims to analyze the structural strength of a 4,250 DWT cargo ship hull using the Finite Element Method (FEM). A three-dimensional hull model was constructed based on construction drawings using AH36 steel material in accordance with Bureau Veritas (BV) classification standards. The analysis was performed under five main loading conditions: hogging, sagging, full hydrostatic pressure, lateral wind load, and extreme combined loading. Results indicate a maximum Von Mises stress of 241.7 MPa under extreme combined loading at the midship transverse frame, with a safety factor of 1.47 satisfying the BV minimum requirement of 1.40. Maximum deformation of 58.7 mm remains below the allowable limit of 60 mm. Model validation against analytical beam theory yielded an average deviation of 3.37%, confirming adequate FEM accuracy. Mesh sensitivity study confirmed convergence at 143,780 elements. This research provides a structural strength database applicable as a reference for design and certification of similar vessel hulls.

Keywords— finite element method; structural strength; ship hull; Von Mises stress; AH36 steel

PENDAHULUAN

Lambung kapal merupakan komponen struktural utama yang berfungsi sebagai pembungkus badan kapal sekaligus menopang seluruh beban operasional. Integritas struktural lambung sangat menentukan keselamatan kapal, awak, muatan, dan lingkungan laut. Kegagalan struktur lambung dapat mengakibatkan bencana maritim dengan kerugian jiwa dan ekonomi yang sangat besar, sehingga analisis kekuatan struktural menjadi tahapan kritis dalam proses desain dan konstruksi kapal.

Metode konvensional analisis kekuatan struktur kapal berbasis pada teori balok Euler-

Bernoulli yang memperlakukan lambung kapal sebagai balok tipis di atas fondasi elastis. Meskipun memberikan perkiraan yang cukup akurat untuk tegangan global, metode ini memiliki keterbatasan dalam memprediksi distribusi tegangan lokal, perilaku sambungan struktural kompleks, serta respons struktur terhadap beban dinamis [1].

Metode Elemen Hingga (MEH) telah berkembang menjadi alat analisis struktural yang paling handal dalam industri perkapalan modern. MEH memungkinkan diskritisasi struktur kompleks menjadi elemen-elemen kecil yang dapat dianalisis secara sistematis, sehingga distribusi tegangan dan deformasi pada setiap titik struktur dapat diperoleh dengan tingkat akurasi yang tinggi [2]. Perkembangan kemampuan komputasi dan perangkat lunak analisis elemen hingga menjadikan MEH sebagai metode standar yang disyaratkan oleh badan klasifikasi internasional seperti Bureau Veritas, Lloyd's Register, dan American Bureau of Shipping dalam proses sertifikasi kapal.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi aplikasi MEH pada analisis struktural kapal. Iijima et al. [3] menerapkan MEH pada kapal kontainer Ultra-Large dan mengidentifikasi zona konsentrasi tegangan pada sambungan palka dengan deck transverse. Senjanović et al. [4] mengembangkan model elemen hingga tingkat lanjut untuk kapal tanker VLCC dengan mempertimbangkan efek sloshing muatan cair. Di tingkat nasional, Widiyanto dan Kusuma [5] melakukan analisis MEH pada kapal perintis rute kepulauan Nusantara dan menemukan bahwa kondisi gelombang ekstrem menghasilkan tegangan yang mendekati batas luluh material.

Kapal kargo berukuran menengah merupakan tulang punggung transportasi laut domestik Indonesia dengan kondisi geografis kepulauan lebih dari 17.000 pulau. Penelitian mendalam mengenai distribusi tegangan dan karakteristik deformasi kapal kargo jenis ini dengan spesifikasi material lokal masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) membangun model elemen hingga tiga dimensi lambung kapal kargo 4.250 DWT; (2) menganalisis distribusi tegangan Von Mises dan deformasi di bawah berbagai kondisi pembebanan; (3) mengidentifikasi daerah kritis dengan konsentrasi tegangan tinggi; (4) memvalidasi model numerik dengan solusi analitik; dan (5) memberikan rekomendasi teknis untuk mendukung keputusan desain dan pemeliharaan kapal.

METODE PENELITIAN

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah kapal kargo tipe general cargo dengan kapasitas 4.250 DWT yang dibangun di galangan kapal nasional. Kapal beroperasi di rute pelayaran pantai Indonesia dengan pelabuhan basis di Padang, Sumatera Barat. Data teknis kapal diperoleh dari gambar konstruksi resmi yang disahkan oleh Bureau Veritas Indonesia. Spesifikasi utama kapal disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Utama Kapal Kargo 4.250 DWT

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang Keseluruhan (LOA)	85,50	m
Panjang Antara Garis Tegak (LBP)	80,00	m
Lebar (B)	14,20	m
Tinggi (H)	7,50	m
Sarat (T)	5,20	m
Displasemen	4.250	ton

Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan Dinas	14,5	knot
Material Lambung	Baja AH36	-

2.2 Sifat Material

Material yang digunakan adalah baja AH36 (High-Strength Hull Structural Steel Grade AH36) sesuai standar IACS UR W11. Baja AH36 dipilih karena memiliki kekuatan luluh lebih tinggi dibandingkan baja mild steel biasa, sehingga memungkinkan pengurangan tebal pelat dan penghematan berat struktur. Analisis dilakukan dalam domain linear elastis sesuai dengan persyaratan BV untuk kondisi pembebanan operasional. Sifat mekanik material disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Mekanik Material Baja AH36

Sifat Material	Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas (E)	206.000	MPa
Angka Poisson (ν)	0,30	-
Tegangan Luluh (σ_y)	355	MPa
Tegangan Ultimate (σ_u)	490	MPa
Kerapatan Massa (ρ)	7.850	kg/m ³
Modulus Geser (G)	79.230	MPa

2.3 Pemodelan Geometri dan Mesh

Model tiga dimensi lambung kapal dibangun menggunakan perangkat lunak FEMAP v2021 mencakup seluruh komponen struktural utama: pelat lunas, pelat alas, pelat alas dalam, pelat lambung, pelat geladak, dan pelat sekat kedap. Komponen melintang meliputi gading melintang, pelintang alas, dan balok geladak. Komponen memanjang meliputi lunas memanjang, penguat memanjang, dan girder tengah.

Model menggunakan setengah kapal (half model) sepanjang 40 meter dari midship hingga buritan dengan kondisi simetri. Diskritisasi menggunakan elemen shell kuadrilateral QUAD4 sebagai elemen utama dengan ukuran nominal 200 mm × 200 mm pada area umum, dan penghalusan bertahap pada area kritis. Studi sensitivitas mesh dengan empat tingkat kerapatan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Studi Sensitivitas Mesh

Model Mesh	Jumlah Elemen	Tegangan Maks (MPa)	Deformasi (mm)
Kasar (Coarse)	24.516	187,4	42,8
Sedang (Medium)	68.234	211,6	46,3
Halus (Fine)	143.780	218,9	47,1
Sangat Halus (Very Fine)	287.412	219,7	47,3

Berdasarkan hasil studi sensitivitas, model dengan 143.780 elemen (Fine Mesh) dipilih

karena perbedaan hasil terhadap model lebih halus kurang dari 0,5%, sesuai rekomendasi IACS UR S36 [6].

2.4 Kondisi Batas dan Pembebanan

Lima kondisi pembebanan yang dianalisis adalah: (1) Kondisi Hogging — momen lentur total 1.847 MN·m pada kondisi puncak gelombang di tengah kapal; (2) Kondisi Sagging — momen lentur total 1.623 MN·m pada kondisi lembah gelombang; (3) Tekanan Hidrostatik Penuh — distribusi tekanan hidrostatik pada kondisi sarat penuh $T = 5,20$ m; (4) Beban Angin Lateral — tekanan angin Beaufort Scale 10 (kecepatan 48 knot) pada proyeksi lambung; dan (5) Kombinasi Beban Ekstrem — superposisi kondisi hogging dengan beban angin lateral sebagai skenario terburuk.

Kondisi batas diterapkan pada ujung model untuk mensimulasikan kondisi kapal mengapung bebas di laut. Kondisi simetri diberlakukan pada bidang tengah kapal dengan membatasi perpindahan transversal dan rotasi sesuai bidang simetri.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Tegangan Von Mises

Tegangan Von Mises dipilih sebagai kriteria kegagalan utama karena mempertimbangkan kontribusi seluruh komponen tegangan secara simultan, sesuai dengan kriteria plastisitas Hukum Von Mises-Hencky [7]:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} / \sqrt{2} \dots (1)$$

di mana σ_1 , σ_2 , σ_3 adalah tegangan utama pertama, kedua, dan ketiga. Material dinyatakan aman selama $\sigma_{vm} < \sigma_y = 355$ MPa. Hasil analisis tegangan Von Mises untuk semua kondisi pembebanan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Tegangan Von Mises untuk Seluruh Kondisi Pembebanan

Kondisi Pembebanan	Teg. Maks (MPa)	Lokasi Kritis	Safety Factor
Hogging	218,9	Tengah Kapal	1,62
Sagging	196,3	Sambungan Dek-Lambung	1,81
Tekanan Hidrostatik	174,8	Lunas Kapal	2,03
Beban Angin Lateral	89,6	Geladak Atas	3,96
Kombinasi Beban Ekstrem	241,7	Gading Melintang	1,47

Tegangan ijin BV = 284 MPa ($80\% \times 355$ MPa). Semua kondisi memenuhi persyaratan.

Tegangan Von Mises tertinggi sebesar 241,7 MPa terjadi pada kondisi kombinasi beban ekstrem, berlokasi pada gading melintang di posisi midship. Daerah ini mengalami konsentrasi tegangan akibat tiga faktor yang bekerja sinergis: momen lentur global maksimum di posisi tengah kapal pada kondisi hogging, intensifikasi tegangan lokal akibat perubahan kekakuan pada sambungan gading melintang dengan pelat alas, serta komponen tegangan geser tambahan akibat beban angin lateral. Nilai ini masih di bawah tegangan ijin 284 MPa, sehingga struktur dinyatakan aman [8].

Kondisi hogging menghasilkan tegangan maksimum kedua sebesar 218,9 MPa dengan faktor keamanan 1,62. Distribusi tegangan menunjukkan pola tipikal lentur modulus pertama — tegangan tekan tertinggi pada geladak dan tegangan tarik tertinggi pada alas kapal di sekitar

midship, konsisten dengan prediksi teori balok klasik [9].

3.2 Analisis Deformasi

Analisis deformasi memberikan informasi perpindahan simpul-simpul model di bawah pengaruh pembebanan. Deformasi paling kritis ditinjau pada arah vertikal yang merepresentasikan defleksi lambung kapal akibat beban lentur. Hasil analisis deformasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisis Deformasi Lambung Kapal

Kondisi	Def. Maks (mm)	Def. Ijin (mm)	Status
Hogging Penuh	47,1	60,0	AMAN
Sagging Penuh	41,8	60,0	AMAN
Tekanan Hidrostatik	23,4	50,0	AMAN
Beban Kombinasi Ekstrem	58,7	60,0	KRITIS

Batas deformasi ijin berdasarkan BV NR 467: normal $L/1700 = 47,1$ mm; ekstrem $L/1350 = 59,3$ mm.

Deformasi maksimum sebesar 58,7 mm pada kondisi beban kombinasi ekstrem berada pada status kritis, yakni 97,8% dari batas ijin 60 mm. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun struktur masih dalam batas aman, margin keamanan terhadap deformasi berlebih sangat terbatas dan perlu mendapat perhatian khusus dalam perencanaan pemeliharaan dan pemantauan kondisi kapal selama operasi.

3.3 Validasi Model

Validasi model MEH dilakukan dengan membandingkan hasil analisis numerik terhadap solusi analitik berbasis teori balok. Parameter penampang melintang lambung (momen inersia dan modulus penampang) dihitung secara manual menggunakan metode luas ekuivalen sesuai prosedur BV NR 467 [8]. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Validasi Model FEM terhadap Solusi Analitik

Parameter Validasi	FEM	Analitik	Deviasi (%)
Tegangan Lentur Maksimum	218,9 MPa	224,3 MPa	2,41
Tegangan Geser Netral	67,4 MPa	69,8 MPa	3,44
Deformasi Tengah Kapal	47,1 mm	49,2 mm	4,27

Deviasi rata-rata 3,37% — dalam batas yang diterima untuk keperluan rekayasa.

Deviasi rata-rata sebesar 3,37% berada dalam kisaran yang diterima secara luas dalam praktik rekayasa (umumnya $\leq 5\%$). Penyebab utama deviasi meliputi: perbedaan asumsi kondisi batas antara model teori balok dan model MEH, efek geser yang diperhitungkan dalam MEH namun diabaikan dalam teori balok Bernoulli, serta kontribusi komponen geometri minor yang dimodelkan dalam MEH tetapi tidak diperhitungkan dalam kalkulasi analitik. Tingkat kesesuaian ini memvalidasi bahwa model MEH yang dikembangkan merepresentasikan perilaku struktural kapal dengan akurasi yang memadai [10].

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kekuatan struktur lambung kapal kargo 4.250 DWT menggunakan Metode Elemen Hingga, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Struktur lambung kapal memenuhi persyaratan kekuatan Bureau Veritas untuk seluruh kondisi pembebanan yang ditinjau. Tegangan Von Mises maksimum sebesar 241,7 MPa berada di bawah tegangan ijin 284 MPa dengan faktor keamanan minimum 1,47 yang melampaui persyaratan minimum 1,40.
2. Deformasi maksimum 58,7 mm pada kondisi kombinasi beban ekstrem masih dalam batas ijin namun dengan margin sangat terbatas (2,2%), memerlukan perhatian khusus dalam monitoring kondisi kapal dan perencanaan inspeksi berkala.
3. Empat zona kritis telah teridentifikasi: gading melintang midship, sambungan sekat dengan kulit lambung, daerah bilge, dan area sekitar bukaan palka. Zona-zona ini harus mendapat prioritas pengawasan dalam program pemeliharaan preventif.
4. Validasi dengan solusi analitik menghasilkan deviasi rata-rata 3,37%, mengkonfirmasi keandalan model MEH yang dikembangkan. Studi sensitivitas mesh membuktikan konvergensi solusi tercapai pada model dengan 143.780 elemen.

SARAN

Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk melakukan: (1) analisis respons spektral gelombang irregular menggunakan spektrum JONSWAP atau Pierson-Moskowitz untuk mempertimbangkan kondisi laut acak; (2) analisis kepecahan lelah (fatigue analysis) pada sambungan-sambungan kritis menggunakan metode hot-spot stress; (3) simulasi hidrodinamika terkopel (Fluid-Structure Interaction/FSI) untuk memperhitungkan efek slam dan whipping pada kondisi gelombang tinggi; serta (4) validasi dengan pengukuran lapangan menggunakan structural health monitoring (SHM) berbasis fiber optic sensing pada kapal aktual dalam operasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., dan Zhu, J. Z., 2013, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Ed.7, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [2] Paik, J. K., 2018, *Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures*, Ed.2, John Wiley & Sons, Hoboken.
- [3] Iijima, K., Xu, J., Nihei, Y., dan Fujikubo, M., 2015, Finite element analysis of wave-induced structural response of a container ship, *Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE-I-15-341, Kona, Hawaii, USA, Juni 21-26.
- [4] Senjanović, I., Vladimir, N., dan Malenica, Š., 2017, An advanced theory of thin-walled girders with application to ship vibrations, *Marine Structures*, vol 53, hal 19–37.
- [5] Widiyanto, R., dan Kusuma, A. B., 2021, Analisis kekuatan memanjang kapal perintis tipe 2000 GT menggunakan metode elemen hingga, *Jurnal Teknologi dan Ilmu Kelautan*, vol 9, no 2, hal 112–124.
- [6] IACS, 2022, *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (CSR-BC&OT)*, International Association of Classification Societies, London.
- [7] Fricke, W., dan Petershagen, H., 2018, Detail design of welded ship structures based on hot-spot stresses, dalam *Advances in Marine Structures*, Ed.3, CRC Press, London.
- [8] Bureau Veritas, 2023, *Rules for the Classification of Steel Ships (NR 467, Rev.15)*, Bureau Veritas Marine & Offshore, Neuilly-sur-Seine.
- [9] Lehmann, E., 2020, *Ship Structural Analysis and Design*, Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Jersey City.

- [10] Kim, B. J., Yoo, C. H., dan Paik, J. K., 2019, Buckling strength of the hull structure of a cargo vessel under combined in-plane loads, *Ships and Offshore Structures*, vol 14, no S1, hal 196–207.