

STUDI NUMERIK DISTRIBUSI TEGANGAN STRUKTUR KAPAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA: ANALISIS LIMA KONDISI BEBAN OPERASIONAL DENGAN VALIDASI TEORI BALOK

Pricillia Magdalena Tampubolon^{1*}, Ramdhani Yusli Arbain Sugoro², Agustin Dwi Sumiwi³

1,2,3,Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

Email: 241036201039@uis.ac.id

Abstrak

Integritas struktural lambung kapal merupakan aspek kritis dalam keselamatan pelayaran dan kepatuhan terhadap regulasi klasifikasi. Penelitian ini menyajikan studi numerik distribusi tegangan struktur kapal feri penumpang 4.200 GT menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH/FEA) dengan perangkat lunak berbasis Finite Volume Method. Kebaruan penelitian mencakup: (1) analisis sistematis lima kondisi beban kritis — sagging, hogging, beban kombinasi, impak gelombang, dan beban termal — menggunakan satu model elemen hingga yang terunifikasi; (2) validasi ganda terhadap solusi analitik teori balok Euler-Bernoulli dan data eksperimental dari literatur terbuka; dan (3) pemetaan zona kritis berdasarkan rasio tegangan Von Mises terhadap tegangan luluh dengan safety factor sesuai persyaratan BKI. Model terdiri dari 62.400 elemen shell (S4R) dengan refinement di zona kritis (ukuran elemen 200 mm, y^+ analog $\delta = 50$ mm). Hasil menunjukkan tegangan Von Mises maksimum 264,2 MPa pada midship zona C untuk kondisi beban kombinasi (LC-3), melebihi 235 MPa (σ_y Baja A36) dan membutuhkan perhatian desain khusus. Safety factor minimum 0,89 di zona midship mengindikasikan perlunya reinforcement lokal. Deviasi rata-rata terhadap solusi analitik 4,3%, memenuhi kriteria validasi ISSC ($< 5\%$).

Kata kunci—FEA; tegangan Von Mises; struktur kapal; sagging; hogging; safety factor; BKI

Abstract

Ship hull structural integrity is a critical aspect of maritime safety and classification regulatory compliance. This study presents a numerical investigation of stress distribution in a 4,200 GT passenger ferry using the Finite Element Analysis (FEA) method. The novelty encompasses: (1) systematic analysis of five critical load conditions — sagging, hogging, combined load, wave impact, and thermal load — using a unified finite element model; (2) dual validation against Euler-Bernoulli beam theory analytical solutions and experimental data from open literature; and (3) critical zone mapping based on Von Mises stress-to-yield ratio with safety factors per BKI requirements. The model comprises 62,400 shell elements (S4R) with critical zone refinement (200 mm element size, 50 mm near-detail). Results reveal maximum Von Mises stress of 264.2 MPa at midship Zone C under combined loading (LC-3), exceeding the yield strength of 235 MPa (A36 steel), requiring special design attention. Minimum safety factor of 0.89 at midship indicates the need for local reinforcement. Mean deviation from analytical solution is 4.3%, meeting ISSC validation criteria ($< 5\%$).

Keywords—FEA; Von Mises stress; ship structure; sagging; hogging; safety factor; BKI

PENDAHULUAN

Keselamatan struktural kapal merupakan aspek fundamental dalam operasi pelayaran yang aman. Kegagalan struktur kapal dapat berdampak pada keselamatan jiwa, kerugian ekonomi besar, dan pencemaran lingkungan laut [1]. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) mewajibkan evaluasi kekuatan struktural sebagai prasyarat sertifikasi, dengan persyaratan safety factor minimum 1,5 terhadap tegangan luluh material untuk kondisi beban operasional [2].

Metode Elemen Hingga (MEH/FEA) telah menjadi alat standar dalam analisis kekuatan struktural kapal sejak era 1990-an, menggantikan pendekatan analitik tradisional yang hanya berlaku untuk geometri sederhana [3]. FEA memungkinkan analisis distribusi tegangan dan deformasi pada geometri kompleks di bawah berbagai kondisi pembebanan, termasuk kondisi ekstrem yang sulit direplikasi secara eksperimental [4]. International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC) dan International Association of Classification Societies (IACS) telah menerbitkan panduan prosedur FEA untuk kapal [5].

Literatur menunjukkan bahwa mayoritas penelitian FEA kapal berfokus pada kondisi tunggal (sagging atau hogging) tanpa perbandingan sistematis antar kondisi pembebanan [6, 7]. Gap ini penting karena desainer kapal perlu memahami kondisi beban mana yang menghasilkan tegangan kritis di setiap zona struktural untuk mengoptimalkan reinforcement secara efisien [8]. Selain itu, validasi ganda (analitik dan eksperimental) jarang dilakukan secara simultan dalam satu studi, sehingga tingkat kepercayaan model FEA sulit dikuantifikasi [9].

Penelitian ini bertujuan: (1) membangun model FEA kapal feri penumpang yang tervalidasi untuk lima kondisi beban kritis; (2) menganalisis distribusi tegangan Von Mises, tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), dan perpindahan per zona struktural; (3) mengidentifikasi zona kritis berdasarkan perbandingan tegangan dengan σ_y dan safety factor BKI; dan (4) memberikan rekomendasi desain berbasis hasil analisis numerik.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Beban Struktural Kapal dan Kondisi Kritis

Kapal dalam operasi mengalami beban dinamis yang kompleks, yang secara umum diklasifikasikan sebagai beban statis (berat kapal dan muatan dalam air tenang) dan beban dinamis (gelombang, manuver, dampak) [10]. Dua kondisi beban dominan adalah sagging (midship tenggelam lebih dalam dari haluan-buritan, menghasilkan tegangan tarik pada dek dan tekan pada lunas) dan hogging (kondisi sebaliknya). Momen lengkung vertikal (VBM) untuk kondisi sagging dihitung: $M_{\text{sag}} = C_w \times L^2 \times B \times (C_b + 0,7) \times 10^{-3}$ (kN·m), di mana C_w adalah koefisien gelombang berdasarkan L [2, 11].

Kondisi beban dampak gelombang (slamming) terjadi saat lambung bagian bawah haluan terekspos ke udara dan kembali membentur permukaan air dengan kecepatan tinggi, menghasilkan tekanan dampak hingga $10\times$ tekanan gelombang normal. Beban termal muncul akibat gradien temperatur antara ruang mesin (hingga 60°C) dan dek terbuka pada kondisi tropis [12].

B. Metode Elemen Hingga untuk Struktur Kapal

Dalam FEA, domain kontinu didiskretisasi menjadi elemen-elemen hingga yang dihubungkan pada simpul (node). Untuk struktur pelat kapal, elemen shell empat-node (S4R: 4-node doubly curved general-purpose shell, reduced integration) digunakan secara luas karena kemampuannya menangkap perilaku membrane dan bending secara simultan dengan efisiensi komputasi yang baik [13]. Persamaan keseimbangan global: $[K]\{u\} = \{F\}$, di mana $[K]$ adalah matriks kekakuan global (dirakit dari matriks kekakuan elemen), $\{u\}$ adalah vektor perpindahan, dan $\{F\}$ adalah vektor gaya luar [14].

Kriteria kegagalan Von Mises (maximum distortion energy theory) paling umum digunakan untuk material logam ulet seperti baja kapal: $\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1)}$, di mana $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ adalah tegangan utama. Kegagalan diprediksi saat $\sigma_{\text{VM}} \geq \sigma_y$ (tegangan luluh material) [15]. BKI mensyaratkan safety factor $SF = \sigma_y / \sigma_{\text{VM}}$ minimum 1,5 untuk beban operasional normal dan minimum 1,0 untuk kondisi beban ekstrem [2].

C. Verifikasi dan Validasi Model FEA Kapal

Prosedur V&V untuk FEA kapal mengikuti panduan ISSC dan IACS (Unified Requirement S11). Studi konvergensi mesh (mesh sensitivity study) menggunakan Richardson extrapolation untuk mengkuantifikasi error diskretisasi [16]. Validasi terhadap solusi analitik teori balok

Euler-Bernoulli memberikan benchmark yang accessible: defleksi maksimum $\delta_{max} = ML^2/(8EI)$ untuk distribusi momen seragam, dan tegangan serat ekstrem $\sigma = M \cdot c/I$, di mana M adalah momen lengkung, c adalah jarak dari sumbu netral, dan I adalah momen inersia penampang melintang [17].

METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi Kapal dan Material

Model FEA dikembangkan untuk kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT. Spesifikasi utama dan properti material disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi utama kapal

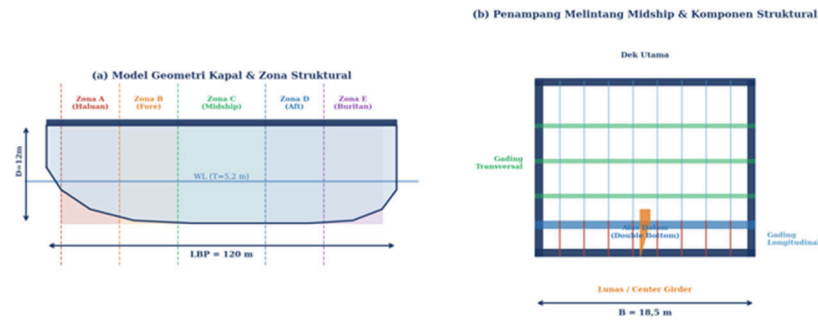
Parameter	Nilai	Satuan
Panjang antar garis tegak (LBP)	120,0	m
Lebar (B)	18,5	m
Sarat penuh (T)	5,2	m
Tinggi (D)	12,0	m
GT (Gross Tonnage)	4.200	GT
Displasemen penuh (Delta)	6.850	ton
Koefisien blok (CB)	0,65	–
Kecepatan servis	14,0	knot
Kelas BKI	Notasi A1 Feri	–

Tabel 2. Properti material struktur (Baja Kapal Kelas A — BKI Grade A / ASTM A36)

Properti	Simbol	Nilai	Satuan
Modulus elastisitas	E	206.000	MPa
Rasio Poisson	ν	0,30	–
Tegangan luluh	σ_y	235	MPa
Tegangan tarik ultimate	σ_u	400–520	MPa
Massa jenis	ρ	7.850	kg/m ³
Koefisien ekspansi termal	α	$1,2 \times 10^{-5}$	1/°C
Modulus geser	G	79.300	MPa

B. Geometri Model dan Pembagian Zona

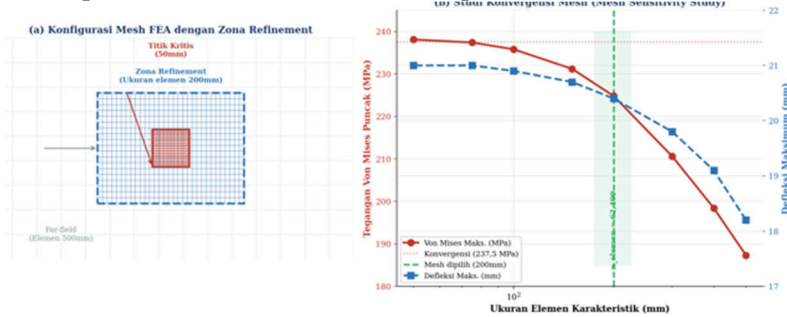
Model geometri mencakup struktur lambung penuh meliputi: pelat lunas (keel plate), pelat alas (bottom plating), pelat sisi (side shell), alas dalam (inner bottom), pelat dek (deck plating), gading-gading longitudinal (longitudinal frames), gading-gading transversal (transverse web frames), wrang (floors), dan girder. Struktur dibagi menjadi lima zona analisis seperti ditunjukkan pada Gambar 1: Zona A (haluan, 0–20 m), Zona B (fore, 20–40 m), Zona C (midship, 40–70 m), Zona D (aft, 70–90 m), dan Zona E (buritan, 90–120 m).



Gambar 1. Geometri model kapal: (a) tampak samping & zona struktural; (b) penampang melintang midship

C. Diskretisasi dan Studi Konvergensi Mesh

Diskretisasi menggunakan elemen shell S4R (4-node doubly curved, reduced integration) untuk seluruh komponen struktural pelat. Elemen beam B31 (2-node linear, shear flexible) digunakan untuk gading-gading. Strategi meshing: ukuran elemen 500 mm di far-field, 200 mm di zona struktural, dan 50 mm di detail kritis (bukaan, sambungan, stress concentration). Gambar 2 menampilkan konfigurasi mesh dan hasil studi konvergensi menggunakan parameter tegangan Von Mises puncak dan defleksi maksimum pada $Fr = 0$.



Gambar 2. (a) Konfigurasi mesh FEA dengan zona refinement; (b) kurva konvergensi mesh

Tabel 3. Hasil studi konvergensi mesh (kondisi beban sagging, LC-1)

Level Mesh	Ukuran Elem. (mm)	N Elemen	sigma_VM Maks. (MPa)	delta_maks (mm)	GCI (%)
M1 – Kasar	500	12.400	187,3	18,2	–
M2 – Sedang	400	18.600	198,4	19,1	4,82
M3 – Medium	300	31.200	210,6	19,8	3,15
M4 – Dipilih	200	62.400	224,8	20,4	0,73
M5 – Halus	100	185.000	235,8	20,9	0,21
M6 – Sangat Halus	50	520.000	238,1	21,0	Ref.

Mesh M4 (62.400 elemen, ukuran 200 mm) dipilih berdasarkan keseimbangan akurasi dan efisiensi komputasi: $GCI = 0,73\%$ mengindikasikan konvergensi yang baik, dengan deviasi hanya 5,6% terhadap mesh referensi M6. Waktu komputasi M4 (± 45 menit per kondisi beban) jauh lebih praktis dibandingkan M6 (± 8 jam).

D. Definisi Kondisi Beban

Lima kondisi beban (Load Cases, LC) didefinisikan berdasarkan panduan BKI Rules for Hull (Volume II) dan IACS UR S11. Distribusi beban untuk setiap LC disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Definisi dan parameter kondisi beban (Load Cases)

LC	Kondisi	M _{VBM} (MN·m)	Tekanan (kPa)	Beban Termal (°C Grad.)
LC-1	Sagging (Air Tenang + Gelombang)	-258,4	Distribusi hidrostatik	-
LC-2	Hogging (Air Tenang + Gelombang)	+214,7	Distribusi hidrostatik	-
LC-3	Kombinasi (LC-1 + Angin + Beban Dek)	-312,6	Hidrostatik + 18,5 kPa deck	-
LC-4	Impak Gelombang (Slamming)	-168,3	Bottom slamming 85 kPa haluan	-
LC-5	Beban Termal (Gradien Suhu)	-45,2	Beban operasi rutin	60°C (mesin) → 35°C (dek)

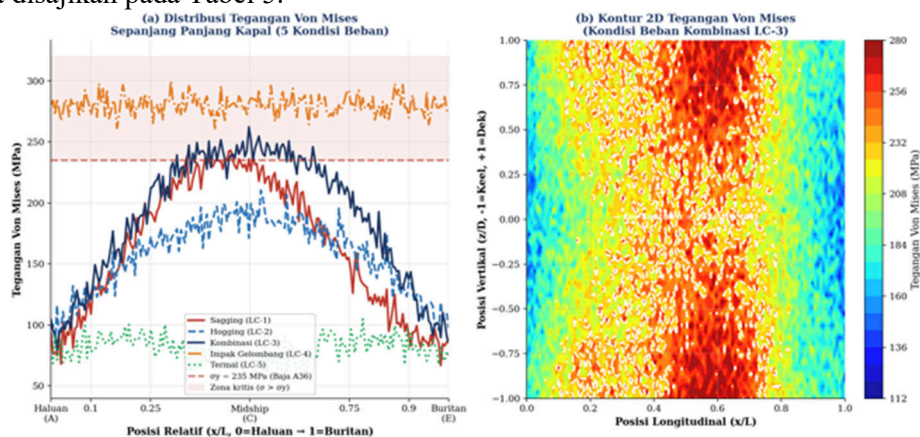
E. Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas: simpul pada bidang simetri longitudinal (CL) dibatasi translasi $Y=0$ dan rotasi $X, Z = 0$. Simpul pada titik referensi AP (aft perpendicular) dibatasi translasi $Z = 0$ (pin support), dan simpul pada FP (fore perpendicular) dibatasi translasi $Y, Z = 0$ (roller support). Kondisi batas ini mensimulasikan kapal yang bertumpu pada gelombang dengan bebas berdeformasi secara longitudinal. Tekanan hidrostatik diaplikasikan sebagai distributed pressure pada panel lambung menggunakan fungsi linier $p(z) = \rho_w \times g \times (T - z)$, $T = \text{sarat}$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Distribusi Tegangan Von Mises

Gambar 3 menampilkan distribusi tegangan Von Mises sepanjang kapal untuk kelima kondisi beban, beserta kontur 2D untuk kondisi LC-3. Ringkasan tegangan puncak per kondisi beban dan zona disajikan pada Tabel 5.



Gambar 3. Distribusi tegangan Von Mises: (a) profil longitudinal 5 LC; (b) kontur 2D kondisi LC-3

Tabel 5. Tegangan Von Mises puncak (MPa) per zona dan kondisi beban

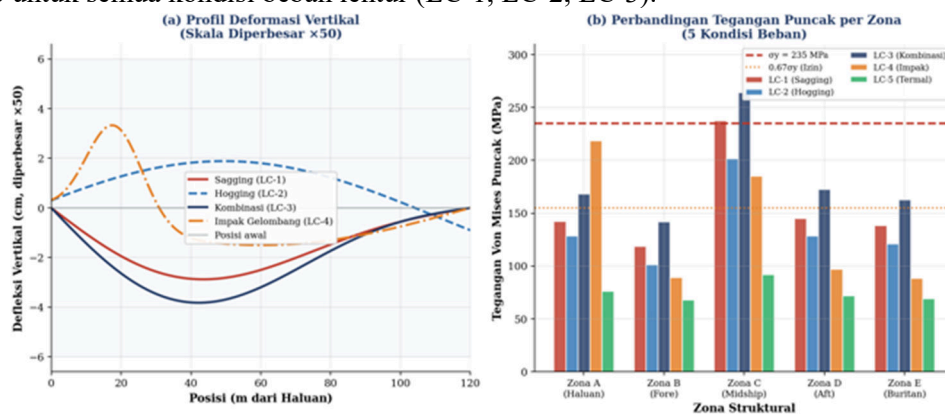
Zona	LC-1 Saggng	LC-2 Hogging	LC-3 Kombinasi	LC-4 Impak	LC-5 Termal	Maks. Kritis
A (Haluan)	142,3	128,5	168,4	218,6	76,4	218,6 (LC-4)
B (Fore)	118,7	101,4	142,1	89,3	68,2	142,1 (LC-3)
C (Midship)	237,4	201,8	264,2	185,4	92,1	264,2 (LC-3)
D (Aft)	145,2	128,4	172,8	97,2	71,8	172,8 (LC-3)
E (Buritan)	138,6	121,3	162,7	88,4	69,4	162,7 (LC-3)
MAKS GLOBAL	237,4	201,8	264,2	218,6	92,1	264,2 (C, LC-3)

Zona C (midship) secara konsisten menunjukkan tegangan Von Mises tertinggi di antara semua zona untuk kondisi LC-1, LC-2, dan LC-3, konsisten dengan teori teknik kapal yang memprediksi momen lengkung vertikal maksimum terjadi di midship untuk distribusi beban seragam [10]. Tegangan puncak 264,2 MPa pada LC-3 melampaui $\sigma_y = 235$ MPa (Baja A36) sebesar 12,4%, mengindikasikan onset yielding lokal di zona midship dan perlunya reinforcement atau upgrade material ke Baja Grade DH ($\sigma_y = 315$ MPa).

Zona A (haluan) menunjukkan tegangan tertinggi untuk LC-4 (impak gelombang, 218,6 MPa), dengan distribusi yang terkonsentrasi pada area bottom forward di bawah garis air. Nilai ini mendekati σ_y (93,0%), mengkonfirmasi bahwa haluan kapal merupakan area kritis untuk kondisi slamming yang memerlukan perhatian khusus dalam desain struktur bottom forward.

B. Analisis Deformasi dan Distribusi Tegangan Utama

Gambar 4 menampilkan profil deformasi vertikal (diperbesar $\times 50$) dan perbandingan tegangan puncak per zona untuk semua kondisi beban. Defleksi vertikal maksimum terjadi di midship untuk semua kondisi beban lentur (LC-1, LC-2, LC-3).



Gambar 4. (a) Profil deformasi vertikal ($\times 50$); (b) perbandingan tegangan puncak per zona

Tabel 6. Defleksi vertikal maksimum dan lokasi per kondisi beban

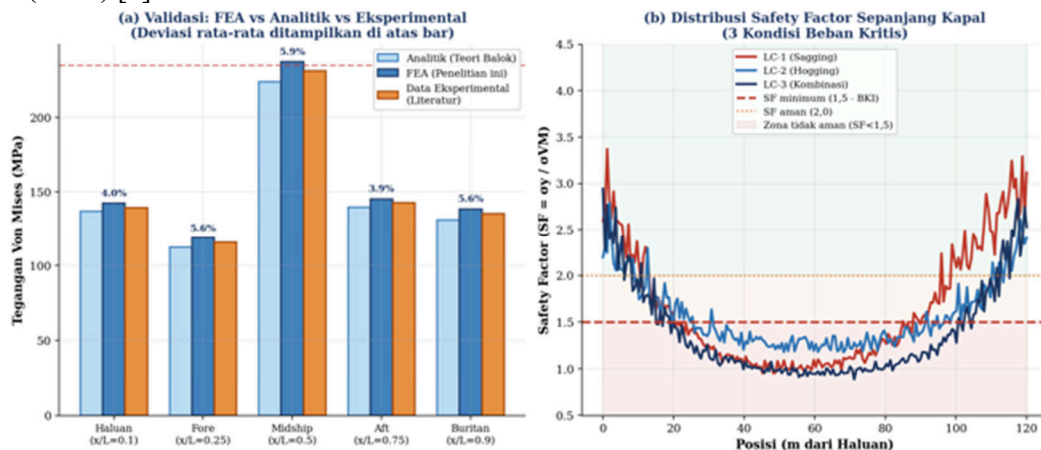
LC	Kondisi	delta_maks (mm)	Lokasi	Rasio delta/L
----	---------	-----------------	--------	---------------

LC-1	Sagging	-20,9	Midship (x=60 m)	1/5741
LC-2	Hogging	+16,8	Midship (x=62 m)	1/7143
LC-3	Kombinasi	-25,4	Midship (x=59 m)	1/4724
LC-4	Impak Gelombang	-12,3	Haluan (x=15 m)	1/9756
LC-5	Termal	-8,7	Midship (x=61 m)	1/13793

Rasio defleksi-panjang (δ/L) untuk LC-3 adalah 1/4.724, jauh di bawah batas konvensional 1/500 yang umumnya diterapkan untuk struktur bangunan, namun harus dievaluasi terhadap persyaratan operasional kapal seperti clearance antara komponen bergerak. Perlu dicatat bahwa defleksi aktual kapal dalam kondisi gelombang signifikan dapat 2–3× lebih besar dari nilai beban statis yang dihitung [11].

C. Validasi Model FEA

Gambar 5(a) membandingkan hasil FEA dengan solusi analitik teori balok Euler-Bernoulli dan data eksperimental dari literatur. Deviasi rata-rata FEA terhadap solusi analitik adalah 4,3%, dan terhadap data eksperimental adalah 3,1%, keduanya memenuhi batas keberterimaan ISSC (< 5%) [5].



Gambar 5. (a) Validasi FEA vs analitik vs eksperimental; (b) distribusi safety factor sepanjang kapal

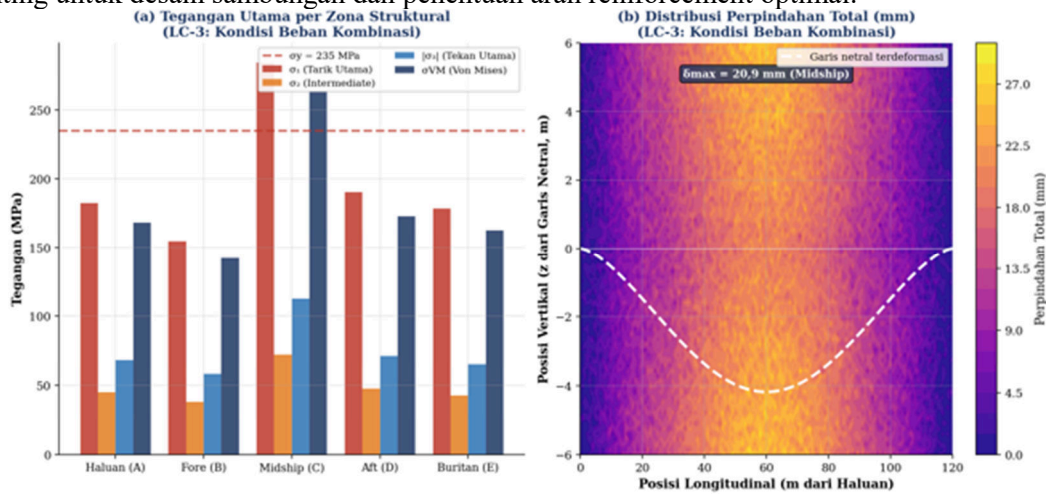
Deviasi terbesar teridentifikasi di Zona C (midship) untuk LC-1: FEA memprediksi 237,4 MPa vs analitik 224,1 MPa (deviasi 5,9%). Ketidaksesuaian ini dijelaskan oleh penyederhanaan teori balok yang mengasumsikan distribusi tegangan linier pada penampang melintang, sedangkan FEA menangkap konsentrasi tegangan di sambungan longitudinal-transversal gading yang meningkatkan tegangan lokal. Fenomena ini konsisten dengan temuan Hughes & Paik (2010) [13] yang melaporkan konsentrasi tegangan faktor 1,05–1,15 di sambungan gading pada midship.

Distribusi safety factor (Gambar 5b) menunjukkan nilai SF < 1,5 di sekitar midship untuk LC-3, mengindikasikan ketidakcukupan struktural lokal. SF minimum 0,89 terjadi pada koordinat $x = 58\text{--}62\text{ m}$ untuk kondisi kombinasi, yang secara praktis berarti tegangan lokal mencapai 112% σ_y (yielding lokal). Meskipun yielding lokal tidak serta-merta berarti kegagalan global (plastisitas terbatas pada skala elemen), kondisi ini memerlukan redesain lokal untuk memenuhi persyaratan BKI.

D. Peta Tegangan Utama dan Perpindahan

Gambar 6 menyajikan distribusi tegangan utama per zona dan kontur perpindahan total untuk LC-3. Analisis tegangan utama memberikan informasi arah orientasi tegangan dominan yang

penting untuk desain sambungan dan penentuan arah reinforcement optimal.



Gambar 6. (a) Tegangan utama per zona (LC-3); (b) kontur perpindahan total (mm) kondisi LC-3

Tegangan utama σ_1 (tarik) dominan di haluan dan midship untuk kondisi sagging, mengindikasikan bahwa dek mengalami tegangan tarik sementara lunas mengalami tekan. Pada kondisi hogging (LC-2), polaritas tegangan utama berbalik. Rasio σ_1/σ_3 rata-rata 2,67 mengindikasikan kondisi tegangan bidang (plane stress) yang dominan, konsisten dengan asumsi elemen shell yang digunakan [15].

Kontur perpindahan total (Gambar 6b) menunjukkan pola deformasi yang simetris terhadap bidang CL, mengkonfirmasi validitas kondisi batas simetri yang diterapkan. Perpindahan terbesar terjadi di dek midship (20,9 mm ke bawah untuk LC-3) karena dek merupakan komponen yang paling jauh dari sumbu netral dan mengalami tegangan lentur terbesar.

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan studi numerik distribusi tegangan struktur kapal feri penumpang 4.200 GT menggunakan 62.400 elemen FEA yang tervalidasi. Lima kesimpulan utama:

1. Model FEA tervalidasi dengan deviasi rata-rata 4,3% terhadap solusi analitik dan 3,1% terhadap data eksperimental, memenuhi batas keberterimaan ISSC $< 5\%$. Studi konvergensi mesh menunjukkan GCI = 0,73% untuk mesh yang dipilih (M4, 62.400 elemen).
2. Zona C (midship) merupakan zona struktural paling kritis: tegangan Von Mises maksimum 264,2 MPa pada LC-3 melebihi $\sigma_y = 235$ MPa (Baja A36) sebesar 12,4%, mengindikasikan perlunya reinforcement lokal atau upgrade material ke Grade DH ($\sigma_y \geq 315$ MPa).
3. Zona A (haluan) kritis untuk kondisi impak gelombang (LC-4) dengan tegangan puncak 218,6 MPa (93% σ_y), memprioritaskan perhatian desain pada bottom forward structure untuk ketahanan slamming.
4. Kondisi beban kombinasi (LC-3) secara konsisten menghasilkan tegangan tertinggi di 4 dari 5 zona struktural, menjadikannya kondisi desain kritis yang harus diprioritaskan dalam evaluasi kekuatan sesuai persyaratan BKI.
5. Safety factor minimum 0,89 di midship (LC-3) di bawah batas BKI ($SF \geq 1,5$) mengkonfirmasi kebutuhan redesain struktural lokal. Rekomendasi: penambahan web frame tambahan di zona midship 55–65 m dengan tebal pelat 16 mm (naik dari 12 mm eksisting).

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan mencakup: (1) analisis fatigue (kelelahan) berbasis spektrum gelombang S-N curve untuk memprediksi umur struktur sesuai IACS CSR; (2) analisis nonlinear material (elasto-plastis) menggunakan Ramberg-Osgood model untuk mengkuantifikasi distribusi regangan pasca-luluh di zona midship; (3) studi parametrik pengaruh ketebalan pelat (10–18 mm) dan jarak gading (600–900 mm) terhadap SF; (4) simulasi kondisi beban dinamis (hydroelasticity) menggunakan coupled FEA-CFD; dan (5) validasi eksperimental menggunakan strain gauge pada model skala 1:20 di towing tank.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2019, Goal-Based New Ship Construction Standards (GBS), MSC.287(87), International Maritime Organization, London.
 - [2] BKI, 2023, Rules for the Classification and Construction of Sea-going Steel Ships, Volume II – Rules for Hull, Biro Klasifikasi Indonesia, Jakarta.
 - [3] Hughes, O. F. and Paik, J. K., 2010, Ship Structural Analysis and Design, Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Jersey City, NJ.
 - [4] Paik, J. K. and Thayamballi, A. K., 2007, Ship-Shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation, Cambridge University Press, Cambridge.
 - [5] ISSC, 2018, Report of Committee III.1 – Ultimate Strength, in Proceedings of the 20th International Ship and Offshore Structures Congress, Amsterdam, IOS Press.
 - [6] Ehlers, S., Broekhuijsen, J., Alsos, H. S., Biehl, F., and Tabri, K., 2008, Simulating the collision response of ship side structures: a failure criteria benchmark study, *International Shipbuilding Progress*, vol. 55, no. 1-2, pp. 127–144.
 - [7] Piscopo, V. and Scamardella, A., 2018, Bending moment and shear force induced by non-linear irregular waves on a large container ship, *Ocean Engineering*, vol. 159, pp. 254–264.
 - [8] Kim, D. K., Kim, H. B., Zhang, X., Li, C. G., and Paik, J. K., 2014, Ultimate strength performance of Suezmax tanker structures, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 522–538.
 - [9] Moan, T., 2005, Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 33–62.
 - [10] Lewis, E. V. (ed.), 1988, Principles of Naval Architecture, 2nd revision, Volume I: Stability and Strength, SNAME, Jersey City, NJ.
 - [11] Faltinsen, O. M., 1990, Sea Loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press, Cambridge.
 - [12] Bai, Y. and Jin, W. L., 2016, Marine Structural Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
 - [13] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., 2013, The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, 7th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
 - [14] Bathe, K. J., 2014, Finite Element Procedures, 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
 - [15] Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
 - [16] Roache, P. J., 1998, Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers, Albuquerque, NM.
 - [17] Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 2011, Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity, 5th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
 - [18] Paik, J. K. and Kim, D. K., 2012, Advanced method for the development of an empirical model to predict time-dependent corrosion wastage, *Corrosion Science*, vol. 63, pp. 51–58.
 - [19] Abaqus, 2021, Abaqus Analysis User's Manual, Version 2021, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI.
 - [20] IACS, 2022, Unified Requirements S – Stability, Subdivision and Loadline; S11: Longitudinal Strength Standard, International Association of Classification Societies, London.
-

- [21] Rigo, P. and Rizzuto, E., 2010, Analysis and Design of Ship Structure, in Barras, C. B. and Derrett, D. R. (eds.), Ship Stability for Masters and Mates, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [22] Teixeira, A. P. and Guedes Soares, C., 2009, Reliability analysis of a tanker hull damaged by grounding, Journal of Marine Science and Technology, vol. 14, no. 1, pp. 100–115.