



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Kajian Kekuatan Struktur dan *Buckling* pada *Livestock Carrier* Catamaran 1500 DWT dengan Metode Elemen Hingga

Jeriko Michael Gunadi Siagian¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Muhammad Iqbal¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : mjeriko2@gmail.com, ahmadfzakki@yahoo.com, iqbal.muhammad.1412@gmail.com

Abstrak

Livestock Carrier merupakan kapal jenis barang yang berlayar di laut hasil dari proses modifikasi yang ditujukan untuk kebutuhan transportasi ternak dan satwa. Seiring perkembangan penelitian kapal di desain kapal dengan bentuk lambung multihull. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kapal dengan lambung multihull memiliki keunggulan dari segi stabilitas dan kecepatan dibandingkan kapal monohull. Faktor lain yang perlu diperhatikan dalam desain kapal yaitu dari segi kekuatan akibat adanya beban kombinasi bertujuan untuk mengetahui respon struktur pada kapal. Software maxsurf digunakan untuk menganalisa besaran momen dan pembebanan kapal dari setiap kondisi dan software FEM Abaqus/CAE untuk menganalisa besaran respon struktur kapal. Pada hasil kekuatan memanjang struktur parallel middle body didapatkan hasil tegangan sebesar 13.5 MPa pada kondisi air tenang, 47.21 MPa pada kondisi *Sagging* dan 19.75 MPa pada kondisi *Hogging* serta deformasi maksimum sebesar 15.48 mm. Perhitungan analisa batas kekuatan maksimum momen lentur vertikal didapatkan sebesar 2.03×10^8 Nm sehingga hal tersebut mengakibatkan struktur mengalami fenomena *buckling*. Perlu diperhatikan pengaruh tinggi *superstructure* kapal dikarenakan pada daerah tersebut terjadi tegangan maksimum. Hasil penelitian ini telah memenuhi syarat regulasi tegangan izin sebesar 191.59 MPa, sehingga kapal dapat beroperasi di perairan Indonesia yang memiliki tinggi gelombang rata-rata sebesar 4 meter.

Kata Kunci : *Livestock Carrier*, Respon Struktur, Momen Lentur Vertikal, Tegangan, Finite Element Analysis

1 PENDAHULUAN

Livestock carrier adalah kapal yang berlayar di laut hasil dari proses modifikasi yang ditujukan untuk kebutuhan transportasi ternak dan satwa yang lain. Pada dasarnya selain stabilitas, desain kapal juga harus memperhatikan aspek kekuatan konstruksi hal ini untuk menghindari terjadinya kegagalan struktur dan kekuatan batas (*ultimate strength*) kapal yang disebabkan oleh faktor luar yaitu gelombang, lingkungan, dan sebagainya, maupun yang disebabkan oleh struktur kapal itu sendiri seperti korosi, deformasi awal, tekanan sisa atau kegagalan struktur yang terjadi karena *human error* (kesalahan manusia).

Tujuan utama dari perancangan struktur kapal adalah menghindari terjadinya kegagalan struktur kapal sehingga untuk mencegah terjadinya hal tersebut sangat penting untuk melakukan analisa terhadap respon struktur dan dapat menjamin

keamanan terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan selama kapal beroperasi.

Lambung katamaran mempunyai geladak muat yang luas juga memiliki stabilitas oleng yang lebih baik, hambatan kecil dan pada displacement yang sama memiliki *seakeeping* yang lebih baik[1]. Pada analisa respon struktur *carrier catamaran* dengan mengabaikan tinggi *superstructure* dalam permodelannya, tegangan maksimum terjadi pada struktur *bridge deck* kapal pada kondisi *sagging*[2]. Umumnya, kapal *livestock carrier* memiliki *superstructure* yang tinggi. Dimana tinggi *superstructure* hampir sama dengan ketinggian sarat kapal, sehingga dapat mempengaruhi kekuatan memanjang dari kapal. Untuk itu dalam melakukan analisa respon struktur kapal dengan *superstructure* perlu di pertimbangkan[3].

Ultimate Strength atau kekuatan batas struktur kapal saat ini merupakan kriteria utama dalam desain struktur kapal, selain itu yang

mempengaruhi kekuatan batas struktur adalah pengaruh *vertical bending moment* atau biasa disebut beban maksimum *hull girder*[4]. Penelitian *ultimate strength* kapal katamaran menunjukkan bahwa daerah kritis terjadi pada *cross deck* sehingga pada plat *cross deck* dapat digunakan plat yang lebih tinggi *yield stress*nya[5].

Pada penelitian kali ini bertujuan untuk menganalisa besaran respon struktur dan kekuatan batas (*ultimate strength*) kapal akibat adanya pengaruh beban internal dan eksternal. Selain itu bagian hubungan antar deck dan lambung secara melintang (*cross deck*), bagian yang diperhatikan adalah bangunan atas (*superstructure*) kapal yang memiliki tinggi hampir sama dengan tinggi sarat kapal.

Penelitian berfokus pada pembebanan statis karena adanya beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban *hydrostatic* pada kondisi air tenang dan akibat adanya tinggi gelombang air laut 2 dan 4 meter. Sehingga dari permasalahan yang ada untuk mengetahui nilai tegangan (*strees*) dan untuk mengetahui fenomena kekuatan batas kapal. Analisa digunakan melalui pendekatan NLFEA.

2 METODE

2.1 Objek Penelitian

Kapal pengangkut ternak (*Livestock Carrier*) adalah kapal yang didesain secara khusus untuk mengangkut sejumlah hewan ternak yang dilengkapi dengan kebutuhan-kebutuhan ternak pada saat berlayar seperti : makanan, air, serbuk kayu untuk kendang, pengobatan ternak, dan sebagainya. Kapal pengangkut ternak dapat berlayar dalam jangka waktu yang cukup lama yaitu dari tiga hari sampai dengan tiga atau empat minggu. Fungsi dari kapal ternak untuk memenuhi kebutuhan pasokan daging sapi di setiap daerah

. Objek dari penelitian ini merupakan data kapal dari penelitian sebelumnya yaitu kapal Ternak tipe Katamaran dengan ukuran utama[6]:

Loa	=	95.76	m
Lpp	=	88	m
B	=	26.75	m
T	=	2.82	m
H	=	6.48	m
Cb	=	0.5	m
Bdemihull	=	5.5	m
Displacement	=	1610	Ton

2.2 Pembebanan Pada Model



Gambar 1. Distribusi LWT+DWT Kapal

Pendistribusian beban kapal secara menyeluruh dilakukan sepanjang *Length Between Perpendicular (LPP)* dibagi 40. Hal tersebut untuk mendapat momen lengkung kapal pada setiap kondisi tinggi gelombang. Pada batasan masalah dilakukan permodelan pada *parallel middle body* kapal di stasion 14 – 27, serta saat kondisi kapal dalam muatan penuh (*full load*). Persebaran beban dapat dilihat pada Gambar 1.

Pemodelan *parallel middle body* dikarenakan pada bagian ruang muat kapal merupakan titik krisis, sedangkan pertimbangan lain dilakukan untuk mempermudah pemodelan. Pemodelan *load condition* pada *maxsurf stability* mengikuti hasil perhitungan kekuatan memanjang kapal.

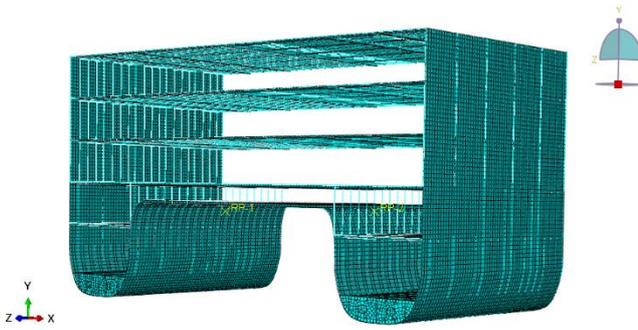
2.3 Konsep Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu pendekatan numerik untuk memecahkan masalah terkait elastisitas linear pada struktur. Permasalahan tersebut di selesaikan dengan formulasi matematis persamaan *differential* yang sesuai dan pada *boundary condition* tertentu[7].

Pengenalan metode elemen hingga dimulai dengan formulasi analisa struktur dengan menggunakan metode *displacement (stiffness method)*[8].

2.4 Pembuatan Model Berbasis Metode Elemen Hingga

Kapal *livestock catamaran* dimodelkan berdasarkan metode elemen hingga dengan bantuan *software* yaitu *Abaqus/CAE* sehingga menjadi *system multi degree of freedom*. Permodelan menggunakan satuan *metric (ton, m, N/m²)* dan permodelan 3D.



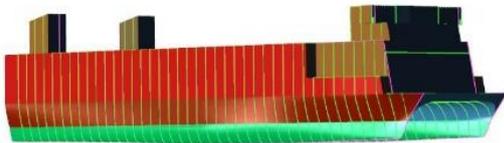
Gambar 2. Permodelan dengan Metode Elemen Hingga

Constraints pada permodelan metode elemen hingga ini terdapat pada *neutral axis* pada ujung depan dan belakang kapal. Seluruh nodes diikat dengan *surface-based kinematic coupling* dengan *master node* pada *neutral axis* dan kondisi translasi serta rotasi sumbu dikontrol pada *master nodes*[5].

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Desain Model kapal

Data model kapal yang didapatkan dari penelitian sebelumnya.



Gambar 3. Permodelan 3D Livestock Carrier Catamaran[6]

3.2 Perhitungan Beban Internal

Distribusi beban internal ditentukan dari hasil perhitungan kekuatan memanjang kapal yang telah didapat. Kemudian total seluruh massa di jumlah untuk memperoleh gaya berat dan dibagi per luas geladak untuk mendapatkan total *pressure* pada tiap geladak. Berdasarkan perhitungan dari *Lloyd Register (LR) : Rules and Regulation for the classification of special service craft*.

Jarak gading dari kamar mesin sampai sekat tubrukan ditentukan menurut rumus :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{Loa}{500} + 0.48 \\
 &= \frac{95,76}{500} + 0.48 \\
 &= 668 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Dimana, *Loa* adalah Panjang keseluruhan kapal. Sehingga jarak gading di depan sekat tubrukan hingga ceruk haluan jarak yang digunakan 668 mm.

Tabel 1. Distribusi Pressure pada Deck

Bagian	Massa (Ton)	Pressure (N/m ²)
Second Deck	41.79	1280
Main Deck	68.20	2080
Deck A	68.20	2080
Deck B	68.20	2080
Deck C	68.20	2080

3.3 Perhitungan Beban Eksternal

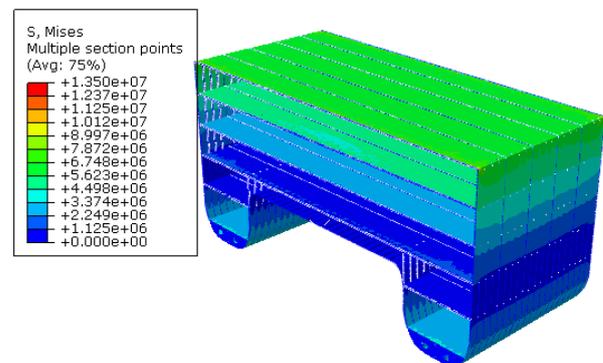
Perhitungan besar beban eksternal akibat tekanan hidrostatik diperlukan untuk mengetahui besarnya tekanan akibat beban eksternal pada permodelan yang telah dibuat, dengan mengasumsikan aliran atau tekanan yang mengenai antara bagian tengah lambung (*demihull*) pada model dianggap statis. Maka, persamaan yang dapat digunakan adalah:

$$P = \rho gh \text{ (N/mm}^2\text{)} \tag{2}$$

Dimana, ρ adalah massa jenis air laut (1025 kg/m³), g adalah percepatan gravitasi bumi (9.807 m/s²) dan h adalah bagian *bottom* dan *side* kapal yang tercelup air (mm).

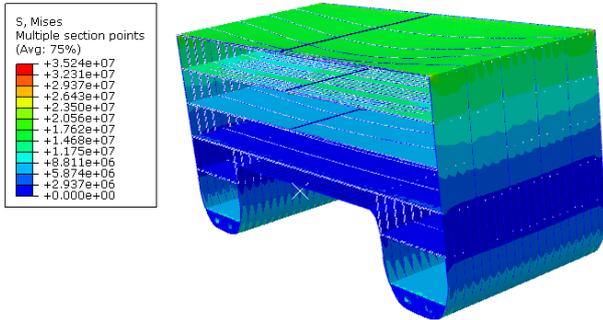
3.4 Analisa Tegangan Menggunakan Abaqus/CAE

Pemodelan *geometry* struktur *parallel middle body* dilakukan menggunakan Abaqus/Cae, untuk mendapatkan respon struktur dilakukan Analisa berupa nilai tegangan maksimum (*stress*) dengan menginput beban internal dan eksternal pada kapal.



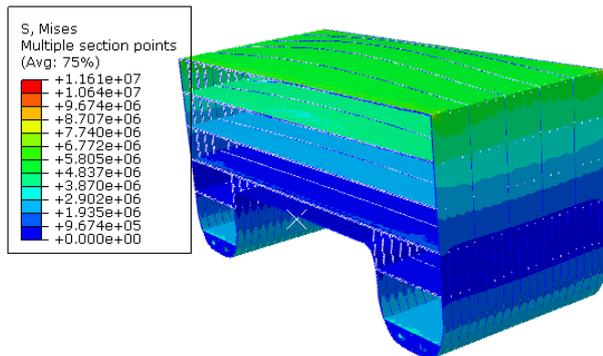
Gambar 4. Tegangan pada kondisi air tenang

Pada kondisi air tenang, tegangan maksimum (*von mises*) sebesar $1.35E+07$ Pa atau 13.5 MPa sebesar pada node @207624 dengan deformasi maksimal 4.20 mm.



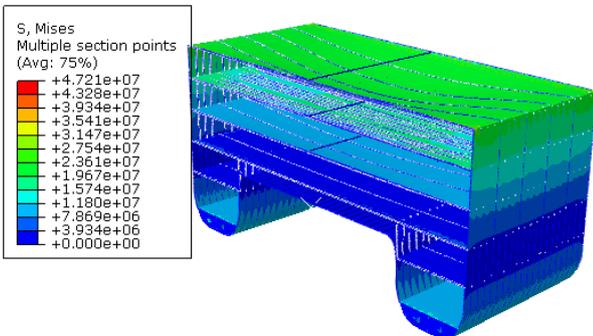
Gambar 5. Tegangan pada tinggi gelombang 2 meter kondisi *Sagging*

Pada kondisi *Sagging*, tegangan maksimum (*von mises*) sebesar $3.524E+07$ Pa atau 35.24 MPa pada elemen *shell* node @324 dengan deformasi maksimal 6.23 mm.



Gambar 6. Tegangan pada tinggi gelombang 2 meter kondisi *Hogging*

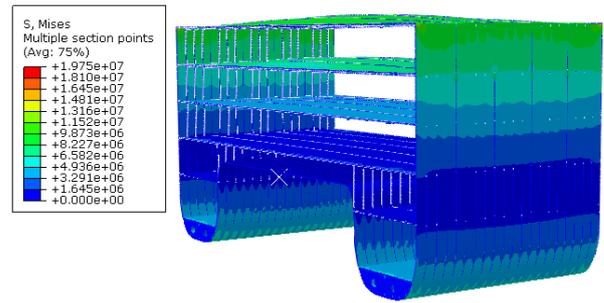
Pada kondisi *Hogging*, tegangan maksimum (*von mises*) sebesar $1.161E+07$ Pa atau 11.61 MPa pada elemen ujung *shell* node @206625 dengan deformasi maksimal 3.59 mm.



Gambar 7. Tegangan pada tinggi gelombang 4 meter kondisi *Sagging*

Pada kondisi *Sagging*, tegangan maksimum (*von mises*) sebesar $4.721E+07$ Pa atau 47.21 MPa

pada elemen *shell* node @324 dengan deformasi maksimal 15.48 mm.



Gambar 8. Tegangan pada tinggi gelombang 4 meter kondisi *Hogging*

Pada kondisi *Hogging*, tegangan maksimum (*von mises*) sebesar $1.975E+07$ Pa atau 19.75 MPa pada elemen ujung *shell* node @206625 dengan deformasi maksimal 11.26mm.

Rangkuman hasil analisa tegangan maksimum pada tiap kondisi pembebanan dan tinggi gelombang. Hasil dari analisa tegangan maksimum dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisa Tegangan dan *Deformasi* Maksimum

Tinggi Gelombang (m)	Kondisi	Tegangan (MPa)	Deformasi (mm)
-	Air Tenang	13.50	4.20
2	<i>Sagging</i>	11.61	6.23
	<i>Hogging</i>	19.75	3.59
4	<i>Sagging</i>	35.24	15.48
	<i>Hogging</i>	47.21	11.26

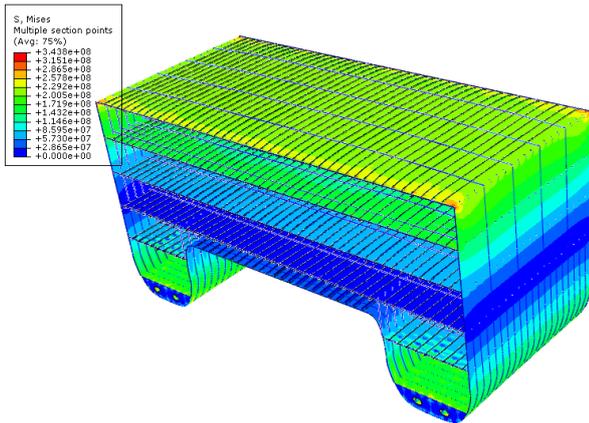
Berdasarkan Tabel 2. Tegangan maksimum dan deformasi maksimal terjadi pada bagian *superstructure* kapal saat kondisi *sagging* dengan nilai tegangan maksimum sebesar 47.21 MPa dan deformasi sebesar 15.48 mm. Hal tersebut dikarenakan momen maksimum yang diinput pada *neutral axis* kapal.

3.5 Analisa Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

Kekuatan batas adalah batas kemampuan struktur ketika mengalami pembebanan maksimum sebelum terjadinya kegagalan (*collapse*) struktur. Momen lentur vertikal dalam analisis struktur kapal terdiri dari beban pada air tenang (M_{sw}) dan beban akibat gelombang (M_w) baik pada kondisi *sagging* dan *hogging*. Perhitungan momen batas kapal dihitung dengan metode NLFEA dan harus memenuhi kriteria seperti persamaan 3 :

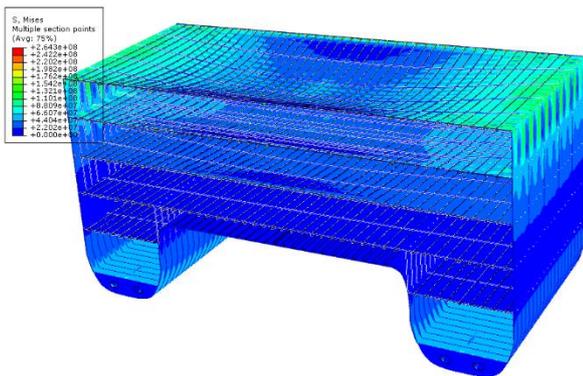
$$M_t = M_{sw} + 1.2M_w \quad (3)$$

dimana M_t adalah momen lentur vertikal dan untuk γ merupakan *safety factor* untuk kekuatan batas lentur vertikal (1.2 untuk kondisi *sagging* dan 1.21 untuk kondisi *hogging*) [9]. Berdasarkan rumus momen lentur batas vertikal diatas, pada saat kondisi *sagging* besar momen lentur batas vertikal sebesar 1.2029×10^8 Nm sedangkan pada saat kondisi *hogging* besar momen lentur batas vertikal sebesar 1.2546×10^8 Nm.



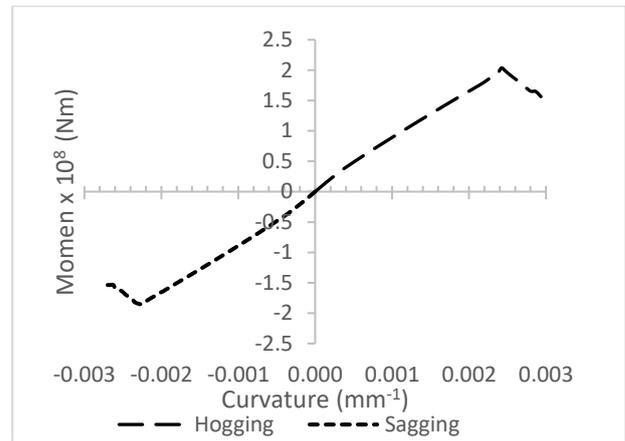
Gambar 9. Von Mises Kekuatan Batas Hull Girder Kondisi Hogging

Pada Gambar 9 diketahui bahwa nilai tegangan terbesar kondisi *hogging* terjadi pada daerah *deck* yang mengalami tarik sementara bagian *bottom* mengalami tekanan dan kondisi *buckling* terjadi pada *deck* serta *bottom*. Tegangan *von mises* yang dialami struktur yaitu sebesar 343.84 MPa.



Gambar 10. Von Mises Kekuatan Batas Hull Girder Kondisi Sagging

Pada Gambar 10 diketahui bahwa nilai tegangan terbesar kondisi *sagging* terjadi pada daerah *bottom* yang mengalami tarik sementara bagian *deck* mengalami tekanan dan kondisi *buckling* terjadi pada *deck* serta *bottom*. Tegangan *von mises* yang dialami struktur yaitu sebesar 264.37 MPa.

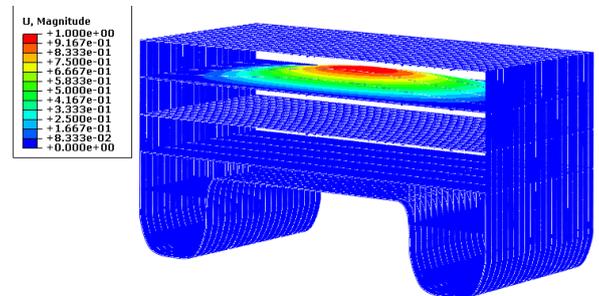


Gambar 11. Kurva Hubungan Momen-Curvature

Pada kurva gambar 11 menjelaskan besar momen lentur- batas vertikal maksimum adalah 2.03×10^8 Nm sehingga struktur mengalami kegagalan (*collapse*) pada saat tersebut.

3.6 Analisa Buckling Livestock Carrier Catamaran

Pemodelan *geometry* struktur *parallel middle body* dilakukan menggunakan Abaqus/CAE, untuk mendapatkan fenomena *buckling* untuk menentukan beban tekuk kritis dimana struktur tidak stabil akibat dari respon struktur kapal dengan menginput beban internal dan eksternal pada kapal.



Gambar 12. Kurva Hubungan Momen-Curvature

Hasil analisa *buckling* pada software Abaqus/CAE merupakan *eigen value*, sehingga hasil beban kritis dimasukkan kedalam persamaan $P_{cr} = P_{applied} \times Eigenvalue$. Hasil Analisa tersebut sebesar 1.2028×10^8 N/m².

3.7 Pengecekan Hasil Analisa

3.7.1 Perhitungan Nilai Midship Section Modulus

Nilai Minimum *midship section modulus* berdasarkan *Rules BKI 2019 Vol. II Section 5 C.2.1*, digunakan dalam perhitungan kekuatan memanjang [9].

Maka, nilai dapat menggunakan rumus :

$$W_{min} = k \cdot c_0 \cdot L^2 \cdot B(C_b + 0.7)10^{-6} \quad (4)$$

$$W > W_{min} \quad (5)$$

Dimana, W_{min} adalah nilai modulus minimum (m^3), k adalah faktor bahan, c_0 koefisien gelombang, L adalah Panjang kapal (m), B adalah lebar kapal (m), dan C_b adalah koefisien blok kapal. Modulus dihitung terhadap geladak (W_{deck}) dan bottom (W_{bottom}). Hasil perhitungan modulus kapal ternak katamaran disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Modulus kapal

Posisi	Modulus	Kriteria BKI	Keterangan
Wdeck	2.13 m ³	0,587 m ³	Memenuhi
Wbottom	1.38 m ³	0,587 m ³	Memenuhi

3.7.2 Perhitungan Safety Factor dan Tegangan Izin

Tegangan izin bertujuan untuk memprediksi besarnya tegangan (*stress*) yang terjadi pada struktur tidak melebihi tegangan (*stress*) batas. Menurut aturan dari *Llyod Register (LR) : Rules and Regulation for the classification of special service craft, Part 6 : Multi Hull Construction in steel*[10]. Perhitungan tegangan izin maksimal dirumuskan pada persamaan :

$$\sigma_p = f_{ogh} \cdot \sigma_s \quad (6)$$

Dimana σ_p adalah tegangan ijin dalam MPa, σ_s , adalah minimum *yield strength* dari material, f_{ogh} adalah koefisien batas tegangan lengkung badan kapal. Untuk menentukan persamaan f_{ogh} dapat dicari berdasarkan Tabel 4.

Tabel 4. Nilai f_{ogh}

Operational mode of craft	f_{ogh}
$\Gamma \geq 3.0$ atau $\Delta \leq 0.004 (L_R B)^{1.5}$	0,80 η_{HTS}
$\Gamma < 3.0$ atau $\Delta > 0.004 (L_R B)^{1.5}$	0,72 η_{HTS}

Dimana :

$$\begin{aligned} \Gamma &= \text{Taylor quotient} \\ &= \frac{V}{\sqrt{L_{wl}}} \\ \Delta &= \text{Displacement (Ton)} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel 4. Didapatkan persamaan:

$$f_{ogh} = 0.80 \eta_{HTS} \quad (7)$$

Dimana, nilai η_{HTS} didapat dari tabel 3 berdasarkan nilai dari σ_s

Tabel 5. Nilai η_{HTS}

σ_s	η_{HTS}
235	1
265	0.964
315	0.956
340	0.934
355	0.919

Berdasarkan persamaan, dan tabel 5. Didapatkan nilai dari tegangan izin sebesar 191.59 MPa.

Tabel 6. Menunjukkan bahwa Nilai Tegangan untuk setiap kondisi Air Tenang, Sagging dan Hogging memenuhi *safety factor* dari hasil kriteria *Llyod Register(LR)*

$$sf = \frac{\sigma_{Ijin}}{\sigma_{Maksimal}} > 1 \quad (8)$$

Tabel 6. Hasil Analisa Tegangan Maksimum

Kondisi	Tegangan (MPa)	Kriteria LR (MPa)	Keterangan
Air Tenang	13.50	191.59	Memenuhi
Sagging HW ₂	32.42	191.59	Memenuhi
Hogging HW ₂	11.61	191.59	Memenuhi
Sagging HW ₄	47.21	191.59	Memenuhi
Hogging HW ₄	19.75	191.59	Memenuhi

3.7.3 Perhitungan Deformasi

Pada penelitian ini, pengecekan hasil deformasi dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan hasil dari perhitungan defleksi software dan perhitungan defleksi manual. Berdasarkan rumus perhitungan manual mekanika teknik, dapat menggunakan persamaan di bawah ini.

$$v(\max) = PL^3/3EI \quad (9)$$

Dimana : $v(\max)$ = Defleksi maksimum

P = Gaya (N)

L = Panjang (mm)

E = Modulus Elastisitas (N/mm²)

$$I = \text{Momen Inersia} \\ (\text{mm}^4)$$

Tabel 7. Nilai P, E, L dan I

P (N)	E (N/mm ²)	L (mm)	I (mm ⁴)
9.16×10^5	2.1×10^5	13360	1.80×10^{13}

$$v(\text{max}) = PL^3/3EI$$

$$v(\text{max}) = \frac{9.16 \times 10^5 \times 2.38 \times 10^{12}}{3 \times 2.1 \times 10^5 \times 1.080^{13}}$$

$$v(\text{max}) = 3.20 \times 10^{-1} \text{ mm}$$

Tabel 8. Hasil Analisa Deformasi

Kondisi	Perhitungan Manual (mm)	Perhitungan Software (mm)	Keterangan
Air Tenang	3.2×10^{-1}	3.14×10^{-1}	Memenuhi

Nilai perhitungan manual deformasi dalam kondisi air tenang yang didapat adalah 3.20×10^{-1} mm. Sedangkan, deformasi yang didapat dengan perhitungan software sebesar 3.14×10^{-1} mm, dengan koreksi 98.001%. Jadi, kriteria hasil perhitungan software dan manual memenuhi

3.7.4 Perhitungan Kekuatan Batas

Kriteria perhitungan nilai maksimum momen lentur vertikal berdasarkan *Rules BKI 2019 Vol. II*[9] adalah sebagai berikut :

$$\left| M_{sw} + \frac{\gamma_{wv} \cdot M_{wv}}{c_s} \right| \leq \left| \frac{M_u}{\gamma_R} \right| \quad (10)$$

Dimana :

M_{sw} = Momen saat kondisi air tenang

M_{wv} = Momen saat kondisi sagging-hogging

M_u = Moment *pure bending* kapal

Γ_{wv} = *Safety factor* kekuatan (1,1 Sagging, 1,21 Hogging)

Hasil perhitungan berdasarkan NLFEA nilai M_u sebesar 2.03×10^8 Nm sementara nilai $M_{sw} + M_{wv}$ sebesar 1.2029×10^8 Nm pada kondisi *sagging*

dan 1.2546×10^8 Nm. Pada kondisi *hogging* sehingga berdasarkan hasil tersebut, maka nilai memenuhi kriteria dari BKI.

3.8 Kesimpulan

Hasil perhitungan beban eksternal kapal 40221 N/mm² akibat adanya tekanan hidrostatis yang terjadi pada *demihull* kapal disebabkan oleh tinggi gelombang perairan.

Respon struktur yang terjadi pada *livestock carrier catamarana* terjadi dengan tegangan maksimum sebesar 47.21 MPa pada kondisi *sagging* dan deformasi yang terjadi sebesar 15.48 mm pada tinggi gelombang 4 meter sementara pada kondisi *hogging* tegangan maksimum sebesar 19.75 MPa dan deformasi sebesar 11.26 mm.

Kekuatan batas kapal terjadi saat kapal mendapat momen vertikal maksimum sebesar 2.03×10^8 Nm yang terjadi pada deck C kapal sehingga untuk kapal yang memiliki *superstructure* yang tinggi disarankan untuk melakukan model *superstructure* tersebut dalam menganalisa respon struktur kapal.

Buckling yang terjadi pada *livestock carrier catamaran* didapatkan sebesar 1.2028×10^8 N/m² yang merupakan beban kritis maksimum atau disebut titik kritis kapal sebelum mengalami kegagalan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhammad Bunari. B., M. P. P. 1. Ir. H. Agoes Santoso, M.Sc, and P. Ir. Tony Bambang Musriyadi, "Studi Perbandingan Perencanaan Kapal Katamaran dan Monohull Sebagai Kapal Riset di perairan Bengkalis Riau," *Inst. Teknol. Sepulu Novemb.*, 2011.
- [2] Arpi, Iلمان, "Analisa Respon Struktur Parallel Middle Body Pada Kapal Ternak Tipe Katamaran," *Jurnal Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, pp. 262–269, Sep. 2019.
- [3] J. Andrić *et al.*, "Structural Analysis of Livestock Carrier," in *XIX Simpozij Teorijai praksa brodogradnje*, 2010.
- [4] C. S. Smith, "Influence of local compressive failure on ultimate longitudinal strength of a ship's hull," *Trans PRADS*, vol. 1977, pp. 73–79, 1977.
- [5] S. Xu, B. Liu, Y. Garbatov, W. Wu, and C. Guedes Soares, "Experimental and

numerical analysis of ultimate strength of inland catamaran subjected to vertical bending moment,” *Ocean Eng.*, vol. 188, no. July, p. 106320, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106320.

- [6] A. Ramadhan, A. F. Zakki, and U. Budiarto, “Rancang Desain dan Konstruksi Kapal Ternak Tipe Katamaran untuk Pelayaran Nasional,” *Jurnal Tek. Perkapalan; Vol 6, No 4 Oktober*, 2018,
- [7] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, “The finite element method fifth edition volume 1: the basis,” *Massachusetts: Butterworth-Heinemann*, 2000.
- [8] A. F. Zakki, “Metode Elemen Hingga,” *Lemb. Pengemb. dan Penjaminan Mutu Pendidik. Univ. Diponegoro. Indones.*, 2014.
- [9] B. K. Indonesia, “Rules for Hull (Pt.1,Vol.II) 2019 ed.,” vol. II, 2019.
- [10] S. S. Craft, “Rules and Regulations for Special Service Craft ,” *LR Lloyd’s Regist.*, no. 3, 2016.