



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Studi Perancangan Sistem Konstruksi dan Analisa Kekuatan *Fish Processing Vessel* dengan Bentuk Lambung *Catamaran* pada Perairan Indonesia

Muhammad Nurazim¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Berlian Arswendo¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*^{e-mail} :mnurazim@students.undip.ac.id , ahmadfzakki@yahoo.com, berlianarswendokapal@gmail.com

Abstrak

Fish Processing Vessel adalah kapal yang membantu kapal perikanan lain saat berlayar bersama dalam fasilitas hasil penangkapan. Kapal ini memiliki bentuk lambung *catamaran* yang sudah mempunyai stabilitas, kecepatan, dan efisiensi yang baik. Hal lain yang mempengaruhi desain kapal adalah dalam segi konstruksi dan kekuatan yang harus memenuhi kriteria dan sesuai dengan bebannya. Pada lambung *multi-hull* terdapat konstruksi sambungan *demi hull* dengan *wet deck* yang kritis dan rentan terhadap defleksi. Sehingga penelitian melakukan perancangan jenis konstruksi dan melakukan variasi pada konstruksi *wet deck*, yaitu konstruksi melintang (variasi I) dan memanjang (variasi II). Analisis respon struktur dilakukan pada kondisi air tenang, *sagging*, dan *hogging* serta analisis kekuatan batas akibat momen lentur *sagging* & *hogging*. Didapatkan hasil pada analisis respon struktur, stress pada variasi II lebih kecil dibanding dengan variasi I dengan presentase 0.15% pada air tenang, 2.87% pada *sagging*, dan 4.16% pada *hogging*. Dan pada analisis kekuatan batas, variasi I lebih cepat mengalami kegagalan dengan tegangan ultimate sebesar 409.3 MPa pada *sagging* dengan momen -4.44×10^{11} Nmm dan 428.5 MPa pada *hogging* dengan momen 5.97×10^{11} Nmm. Dan pada perhitungan massa, sistem konstruksi variasi II lebih ringan 8.851 ton. Dapat disimpulkan konstruksi variasi II lebih direkomendasikan dibanding konstruksi variasi I.

Kata Kunci : *Catamaran*, Konstruksi, Kekuatan, Ultimate

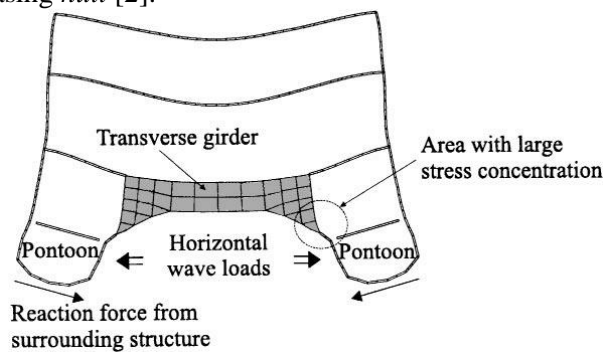
1. PENDAHULUAN

Fish Processing Vessel atau dapat juga disebut *factory ship* adalah kapal yang membantu kapal perikanan lain dalam fasilitas hasil penangkapan pada saat masih ditengah laut. *Fish processing vessel* berlayar ke tengah laut bersama kapal-kapal ikan yang lebih kecil. Dalam mendesain sebuah kapal, banyak sekali aspek yang perlu dipenuhi. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan perancangan *hullform fish processing vessel* tipe *katamaran* ini. Dihasilkan bentuk dan karakteristik lambung yang memiliki hambatan, stabilitas, dan olah gerak yang baik[1]. Akan tetapi belum ada studi perancangan sistem konstruksi pada *fish processing vessel* ini. Sehingga diperlukan

perancangan sistem konstruksi agar kapal ini memiliki struktur dan tingkat tegangan (akibat gelombang, pembebanan internal, maupun momen lentur yang diterima oleh kapal) yang memenuhi kriteria *rules* dan yang sesuai dengan bebannya. Konstruksi kapal harus dirancang menghindari deformasi elastis yang diluar batas yang akan mengakibatkan perubahan bentuk atau deformasi plastis.

Hal yang membedakan konstruksi kapal *multi hull* dengan *mono hull* salah satunya adalah terdapat konstruksi sambungan antar *demi hull* dengan *wet deck* atau yang biasa disebut *cross deck*. Konstruksi pada *cross deck* merupakan konstruksi yang rentan terhadap defleksi akibat

gelombang yang terjadi pada *tunnel* pada masing-masing *hull* [2].



Gambar 1. *Tranverse Deformation of Catamaran Cross-Section Exposed to Horizontal Waveloads*[3]

Saat lambung katamaran terkena beban yang akan memberikan *tranverse deformation* ke bagian *poonton*, terjadi tegangan yang besar di area yang memiliki konsentrasi tegangan yang tinggi seperti sambungan antara *tranverse girder* dan *poontons*[3]. Oleh karena itu diperlukan konstruksi yang tepat pada bagian *wet deck* agar tidak terjadi konsentrasi *stress* yang tinggi.

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]. Untuk menganalisis kekuatan batas dapat disederhanakan menggunakan model minimal satu jarak *frame* saja[5]. Hubungan tegangan-regangan merupakan syarat penting dalam memprediksi *ultimate strength* dari *marine structure*[6]. Pada analisis kekuatan batas menggunakan metode analisis *dynamic explicit*[7].

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sistem konstruksi yang sesuai dengan bebannya dan sesuai dengan kriteria *rules* serta menganalisa respon struktur pada pembebanan statis akibat beban *internal* dan *external* (kondisi air tenang, kondisi *sagging*, kondisi *hogging* dengan tinggi gelombang 4 m) dan mencari karakteristik kekuatan batas kapal dengan pendekatan *NLFEA* akibat momen lentur *sagging* dan momen lentur *hogging* dari hasil perancangan sistem konstruksi dengan variasi pada jenis konstruksi *wet deck* yaitu *wet deck* dengan sistem konstruksi melintang (sistem konstruksi variasi I) dan *wet deck* dengan sistem konstruksi memanjang (sistem konstruksi variasi II).

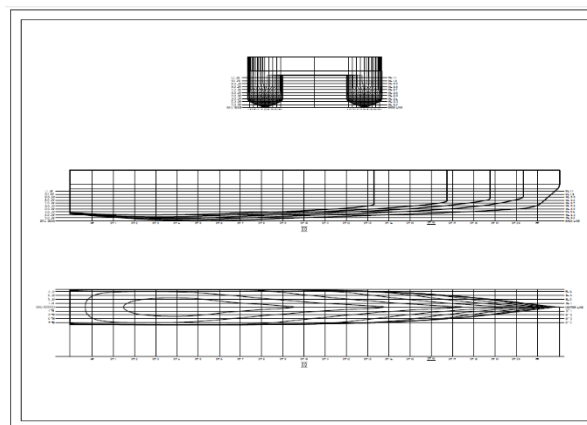
2. METODE

2.1. Objek Penelitian

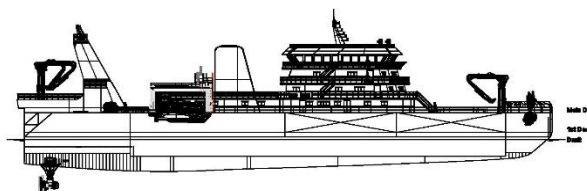
Objek dari penelitian ini merupakan data kapal dari penelitian sebelumnya yaitu *fish processing vessel* dengan ukuran utama yang terdapat pada tabel 1. Gambar 2-4 merupakan gambar kerja yang akan digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Data Kapal

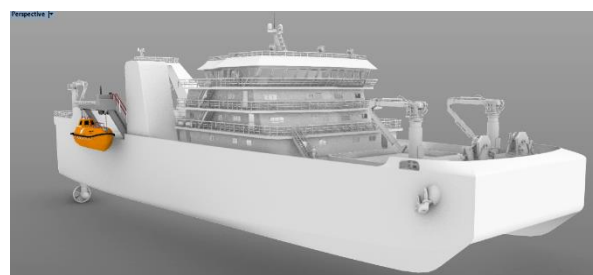
	Data
<i>Material</i>	<i>Steel</i>
Loa	94.7 m
Lpp	85.9 m
B	25.6 m
T	5.74 m
H	9.71 m
Cb	0.61
Vs	17 knot
$B_{Demihull}$	6.71 m
<i>Frame Spacing</i>	0.8 m



Gambar 2. *Lines Plan*



Gambar 3. *General Arrangement*



Gambar 4 *3D Modelling Fish Processing Vessel*

2.2. Perancangan Sistem Konstruksi

Sistem penggadingan kapal dibagi menjadi tiga yaitu sistem penggadingan melintang, sistem penggadingan memanjang, dan sistem penggadingan campuran. Pada konstruksi bagian sisi lebih baik menggunakan konstruksi melintang dan pada bagian *bottom & deck* lebih baik menggunakan konstruksi memanjang [8]. Pada perancangan sistem konstruksi *fish processing vessel* mengkaji dua sistem konstruksi. Penggunaan jenis konstruksi setiap bagiannya pada masing-masing variasi konstruksi terdapat pada tabel 2.

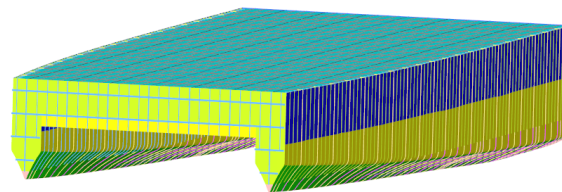
Tabel 2. Jenis Konstruksi tiap Lokasi pada Masing-Masing Variasi Sistem Konstruksi

Lokasi	Jenis Konstruksi	
	Sistem Konstruksi Variasi I	Sistem Konstruksi Variasi II
<i>Side Inboard & Side Outboard</i>	Melintang	Melintang
<i>Bottom</i>	Memanjang	Memanjang
<i>Main Deck</i>	Memanjang	Memanjang
<i>Second Deck</i>	Memanjang	Memanjang
<i>Wet Deck</i>	Melintang	Memanjang

Pada perancangan sistem konstruksi ini, penulis menggunakan acuan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of SpecialCraft* 2019[9].

2.3. Permodelan Menggunakan FE

Finite element method (FEM) atau *finite element analysis (FEA)* adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*) seperti saat ini yaitu analisis tegangan pada stuktur. Pada permodelan *FEM*, intinya adalah membagi suatu benda yang akan dianalisis, menjadi beberapa jumlah bagian hingga (*finite*) atau yang sering disebut sebuah elemen atau yang dapat disebut *meshing*. Dalam permodelan *FEM* meliputi *property material*, ukuran *mesh*, tipe *mesh*, *boundary condition*, dan ukuran model [10]. Hasil *meshing* dari permodelan *hullform* terdapat pada gambar 5.



Gambar 5. Permodelan Menggunakan *Finite Element Method*

2.4. Analisis Respon Struktur

Setelah dilakukan perancangan sistem konstruksi, dilakukan analisis respon struktur untuk mendapatkan nilai deformasi dan tegangan menggunakan pembebanan statis dengan beban *internal (LWT+DWT)* kapal pada saat keadaan *full loaded*, momen lentur, dan tekanan hidrostatis berupa kondisi gelombang air tenang, *sagging*, dan *hogging* dengan tinggi gelombang 4 m.

2.5. Analisis Kekuatan Batas

Pembebanan yang diaplikasikan pada metode *NLFEA (Non linear finite elemen analysis)* menggunakan proses peningkatan beban dan menggunakan dua jenis kontrol beban yaitu kontrol kelengkungan menggunakan *rigid-link* pada kedua sisi ujung model dan kontrol momen lentur untuk mendapatkan nilai momen lentur maksimum kapal [10]. *Ultimate strength* dapat ditentukan dengan memfokuskan perhatian pada kondisi akhir kegagalan struktur *hull girder* akibat *bending*. Kegagalan struktur mempertimbangkan hasil dari tegangan dengan *buckling* pada bagian yang diberi kompresi. Karakteristik *elastic & plastic* pada struktur dihitung dan dipertimbangkan untuk mendapatkan nilai *ultimate strength*[6].

2.6. Boundary Condition

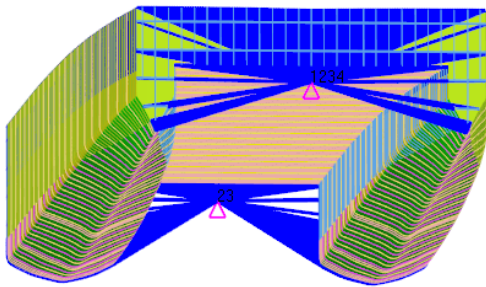
Asumsi *boundary condition* yang diambil harus mendukung sesuai dengan keadaan *real*, sehingga didapat kemiripan kondisi yang semirip mungkin dan dicocokkan dengan temuan dilapangan. Asumsi yang dipakai berpedoman pada beberapa *rules* dan penelitian yang telah ada, sesuai pada tabel 3.

Geometri yang sudah terbentuk *element* diberikan *boundary condition* untuk sebuah *finite element analysis*. Peletakan *boundary condition* berada di *node* ujung depan dan belakang model setinggi *neutral axis* kapal, dengan cara membuat *rigid element RBE2* di kedua ujungnya. Adapun *neutral axis* pada kapal *fish processing vessel* yaitu 5204.118 mm untuk variasi I dan 5215.93 mm

untuk variasi II dengan permodelan kondisi batas seperti pada gambar 6.

Tabel 3. *Boundary Condition*

Lokasi	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Titik independen ujung belakang	-	Fix	Fix	-	-	-
Titik independen ujung depan	Fix	Fix	Fix	Fix	-	-



Gambar 6. *Boundary Condition of FE-model*

Boundary condition didefinisikan pada kedua ujung model, yaitu depan dan belakang [11]. Kondisi batas atau *boundary condition* akan mempengaruhi hasil analisis.

2.7. Pendefinisian Material

Pada penelitian ini, *fish processing vessel* menggunakan material baja dengan spesifikasi berdasarkan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of SpecialCraft 2019* [9] :

<i>Modulus of Elasticity</i>	: 200000 MPa
<i>Poisson Ratio</i>	: 0.3
<i>Density</i>	: 7850 kg/m ³
<i>Yield</i>	: 235 MPa
<i>Ultimate Stress</i>	: 400 MPa

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Desain Konstruksi Kapal

Pada perancangan konstruksi, menggunakan acuan berdasarkan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of SpecialCraft 2019*[9].

a. Tebal Plat

Ketebalan plat ditentukan menggunakan rumus pada persamaan (1) berdasarkan *Lloyd*

Register Rules and Regulation for The classification of SpecialCraft 2019[9] :

$$t_p = 22.4 s \gamma \sqrt{\frac{p k_s}{f_\sigma 235}} \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (1)$$

k_s adalah *higher tensile steel factor*, γ adalah *convex curvature correction factor*, s adalah jarak gading (mm), β adalah *panel aspect ratio correction factor*, p adalah *design pressure* (kN/m²), f_σ adalah *limiting bending stress coefficient for the plating element under consideration*. Sehingga didapat ketebalan plat yang terdapat pada tabel 4.

Tabel 4. *Tebal Plat*

Part	Thickness (mm)
<i>Keel plate</i>	11
<i>Bottom shell</i>	10
<i>Side shell outboard</i>	10
<i>Side shell inboard</i>	10
<i>Inner bottom plate</i>	7
<i>Wet deck plate</i>	10
<i>Second deck plate</i>	4
<i>Main deck plate</i>	6
<i>Longitudinal bulkhead</i>	5
<i>Collision bulkhead</i>	5
<i>Engine room bulkhead</i>	5
<i>Deep tank</i>	6
<i>Floor</i>	15
<i>Center girder</i>	20
<i>Side girder</i>	15
<i>Vertical bottom stiffener</i>	15

b. Perhitungan Profil

Perhitungan *section modulus*, *inertia moment*, dan *web area* menggunakan acuan berdasarkan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of SpecialCraft 2019*[9]

- *Section Modulus*

$$Z = \phi_z \frac{p s l_e^2 k_s}{f_\sigma 235} \text{ cm}^3 \quad (2)$$

- *Inertia Moment*

$$I = \phi_I f_\delta \frac{p s l_e^3}{E} \times 100 \text{ cm}^4 \quad (3)$$

- *Web Area*

$$A_w = \phi_A \frac{p s l_e k_s}{100 f_\tau \left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)} \text{ cm}^2 \quad (4)$$

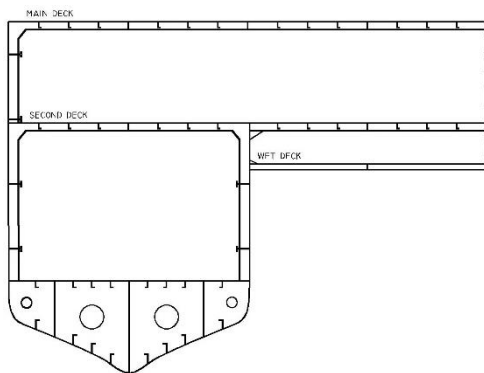
Persamaan (2) digunakan untuk menghitung *section modulus* (Z), persamaan (3) untuk menghitung momen inersia profil, dan persamaan (4) untuk menghitung *web area* profil. Dimana ϕ_z

adalah koefisien modulus penampang, ϕ_I adalah koefisien inersia, ϕ_A adalah koefisien *web area*, p adalah beban, s adalah jarak gading, l_e adalah panjang efektif konstruksi, k_s adalah *tensile steel factor*, f_σ adalah koefisien batas tegangan lengkung, f_δ adalah koefisien batas defleksi, f_τ adalah koefisien batas tegangan geser. Sehingga didapat ukuran profil-profil yang ada pada tabel 5.

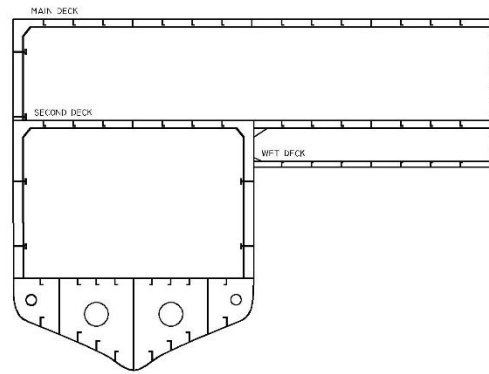
Tabel 5. Ukuran Profil

Part	Dimension (mm)
Web frame inboard	250 x 20 FP 125 x 20
Web frame outboard	250 x 20 FP 125 x 20
Main frame inboard	180 x 95 x 16
Main frame outboard	180 x 95 x 16
Side stringer	320 x 23 FP 145 x 23
Main deck strong beam	200 x 12 FP 100 x 12
Main deck girder	200 x 12 FP 100 x 12
Main deck longitudinal	140 x 60 x 12
Second deck strong beam	200 x 13 FP 100 x 13
Second deck girder	200 x 13 FP 100 x 13
Second deck longitudinal	140 x 60 x 13
Bottom longitudinal	240 x 100 x 20
Inner bottom longitudinal	165 x 75 x 11
Collision bulkhead primary stiffener	190 x 16 FP 87 x 16
Collision bulkhead Secondary stiffener	140 x 65 x 9
Collision bulkhead stringer	240 x 18 FP 135 x 18
Engine room bulkhead primary stiffener	200 x 16 FP 87 x 16
Engine room bulkhead Secondary stiffener	140 x 65 x 9
Engine room bulkhead stringer	245 x 19 FP 135 x 19
Wet deck strong beam	145 x 11 FP 85 x 11
Wet deck girder	145 x 11 FP 85 x 11
Wet deck beam	115 x 50 x 8
(Variasi konstruksi I)	
Wet deck longitudinal	115 x 50 x 8
(Variasi konstruksi II)	

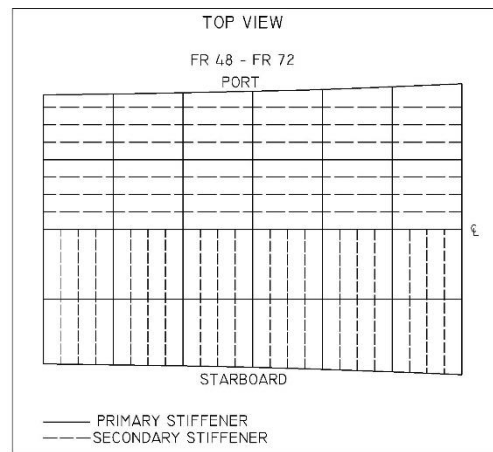
c. Midship Section



Gambar 7. Midship Section Sistem Konstruksi Variasi I



Gambar 8. Midship Section Sistem Konstruksi Variasi II



Gambar 9. Konstruksi Wet Deck (Starboard: Konstruksi Melintang sebagai Variasi I, Port: Konstruksi Memanjang sebagai Variasi II)

Dari hasil perhitungan tebal plat dan ukuran profil, didapat desain sistem konstruksi variasi I yang terdapat pada gambar 6 dan sistem konstruksi variasi II yang terdapat pada gambar 7 dengan penampang *midship*. Perbedaan dua variasi sistem konstruksi terdapat pada bagian *wet deck secondary stiffener* yang dijelaskan pada gambar 9 dengan sisi *starboard* merupakan konstruksi *wetdeck* melintang (sistem konstruksi variasi I) dan sisi *port* merupakan konstruksi *wet deck* memanjang (sistem konstruksi variasi II).

d. Minimum Section Modulus

Perhitungan *minimum midship section modulus* konstruksi pada persamaan (5) diatur berdasarkan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of Special Craft 2019*[9].

$$Z_{min} = \eta HTS L_f L_R^2 B_{WL} (C_b + 0.7) \times 10^{-6} m^3 \quad (5)$$

C_b adalah koefisien blok, B_{WL} adalah lebar maksimum kapal (m), L_R adalah *rule length*, η_{HTS} adalah faktor konsentrasi baja, dan L_f adalah $0,0412L_R + 4,0$ untuk L_R lebih dari 90 m dan $10,75 - (3 - 0,01L_R)^{1,5}$ untuk L_R kurang dari 90 m.

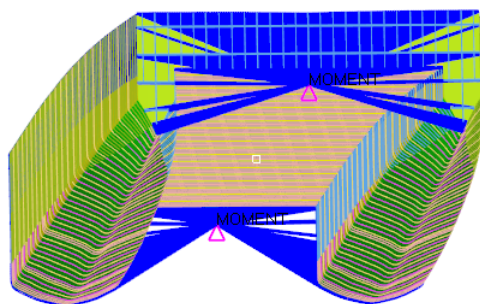
Minimum midship section modulus didapat sebesar $2.141 \times 10^9 \text{ mm}^3$ sehingga *section modulus* sistem konstruksi variasi I dan variasi II memenuhi kriteria *rules* dengan rangkuman yang ada pada tabel 6.

Tabel 6. Modulus Penampang

Bagian	Section Modulus $\times 10^9$ (mm ³)	Kriteria LR Rules $\times 10^9$ (mm ³)	Ket
Variasi I			
W_{top}	2.5625	2.141	Memenuhi
W_{bottom}	2.2187	2.141	Memenuhi
Variasi II			
W_{top}	2.5734	2.141	Memenuhi
W_{bottom}	2.2173	2.141	Memenuhi

3.2. Pembebanan

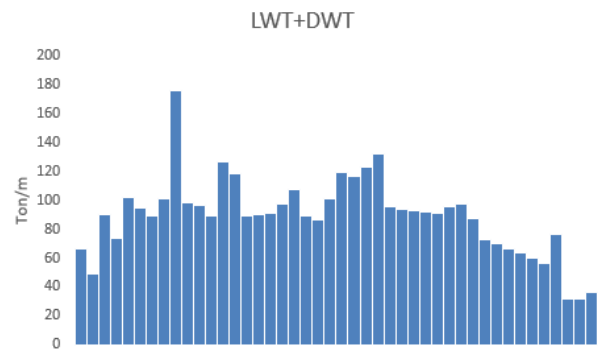
Model beban analisis respon struktur melibatkan tiga jenis beban yang meliputi: pembebanan *internal* (LWT+DWT) yang terdapat pada gambar 11, tekanan hidrostatik gelombang (air tenang, *hogging* dan *sagging*), beban momen lentur yang disimpan pada masing-masing sisi ujung model FE seperti pada gambar 10. Besar momen lentur setiap kondisi ditentukan dari diagram momen lentur pada gambar 12 – 14.



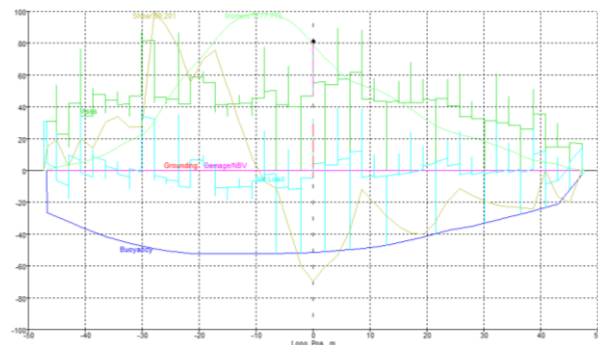
Gambar 10. Permodelan Pembebanan Momen Lentur Analisis Respon Struktur

a. Distribusi beban

Total *displacement* pada *fish processing vessel* adalah 4539 ton dengan pendistribusian seperti pada gambar 11.

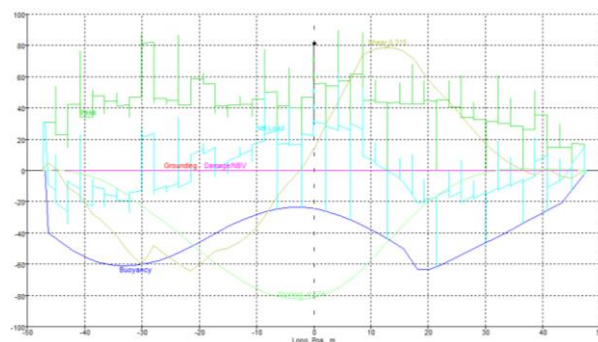


Gambar 11. Distribusi Pembebanan LWT + DWT



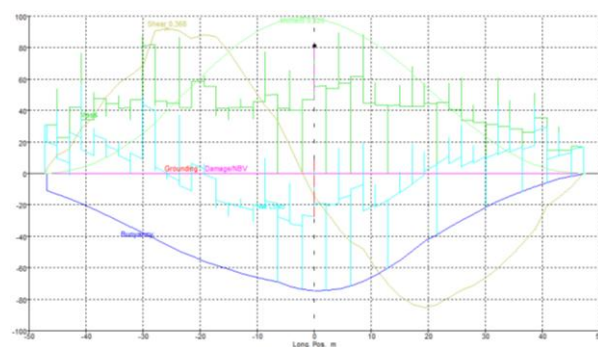
Gambar 12. Diagram Momen Kondisi Air Tenang

Momen maksimum yang terjadi pada air tenang sesuai pada gambar 12 adalah 1577.479 ton.m atau 1.547×10^{10} Nmm.



Gambar 13. Diagram Momen Kondisi Sagging

Momen maksimum yang terjadi pada kondisi *sagging* sesuai pada gambar 13 adalah -6574 ton.m atau -6.447×10^{10} Nmm.



Gambar 14. Diagram Momen Kondisi Hogging

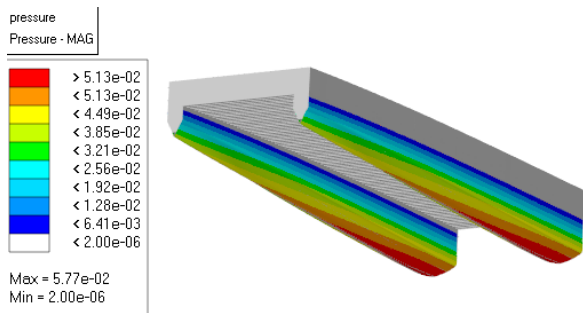
Momen maksimum yang terjadi pada kondisi *hogging* sesuai pada gambar 14 adalah 9920 ton.m atau $9.728e+10$ Nmm.

b. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang diberikan air laut terhadap WSA kapal akibat adanya gaya angkat. Tekanan hidrostatik dihitung menggunakan persamaan (6).

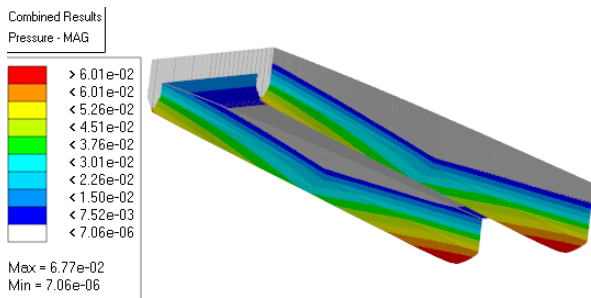
$$P = \rho g H \quad (6)$$

Dimana P adalah tekanan hidrostatik (Pa), ρ adalah massa jenis air laut yaitu 1025 kg/m^3 , g adalah gaya gravitasi yaitu 9.81 m/s^2 H adalah tinggi badan kapal yang tercelup (m) sesuai dengan kondisi gelombang. Ilustrasi distribusi tekanan akibat gelombang dapat dilihat pada gambar 15-17.



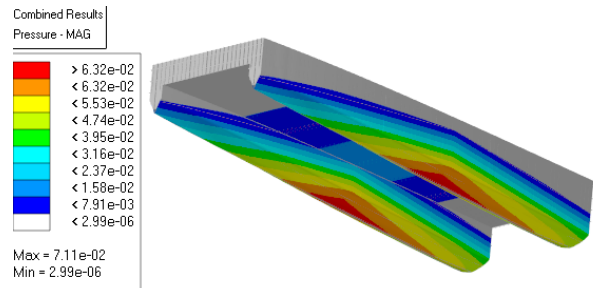
Gambar 15. Distribusi Tekanan Hidrostatik pada Kondisi Air Tenang

Pada gambar 15 tekanan hidrostatik maksimum pada kondisi air tenang adalah 0.0577 Mpa pada ketinggian gelombang mencapai 5740 mm.



Gambar 16. Distribusi Tekanan Hidrostatik pada Kondisi Sagging

Pada gambar 16 tekanan hidrostatik maksimum pada kondisi *sagging* adalah 0.0677 Mpa pada ketinggian gelombang mencapai 6734 mm.

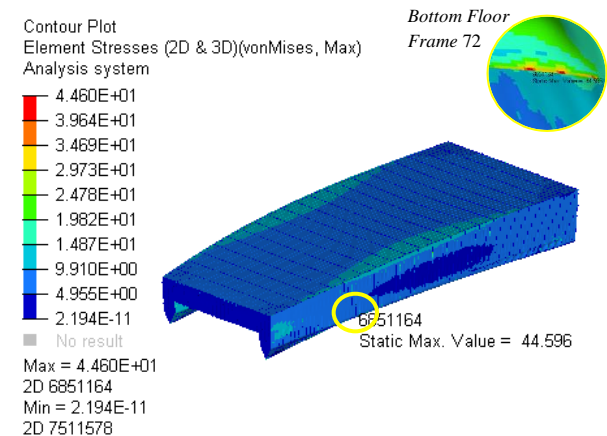


Gambar 17. Distribusi Tekanan Hidrostatik pada Kondisi Hogging

Pada gambar 17 tekanan hidrostatik maksimum pada kondisi *hogging* adalah 0.0711 Mpa pada ketinggian gelombang mencapai 7072.9 mm.

3.3. Hasil Analisis Respon Struktur Sistem Konstruksi Variasi I

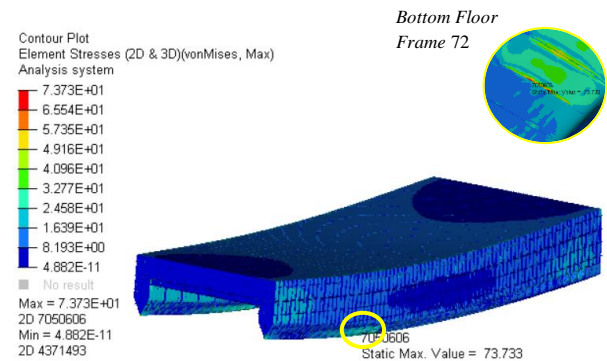
a. Kondisi Air Tenang



Gambar 18. Stress pada Variasi I kondisi Air Tenang

Pada gambar 18 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *bottom floor frame 72* sebesar 44.6 MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

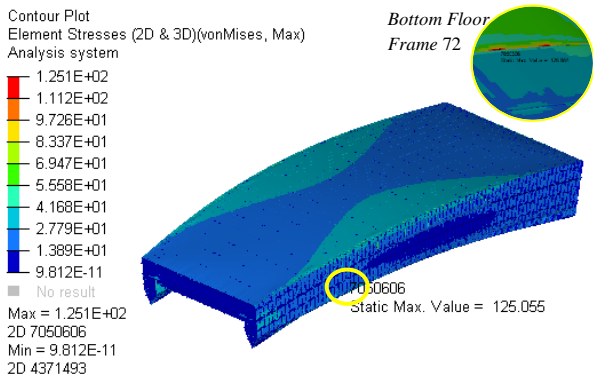
b. Kondisi Sagging



Gambar 19. Stress pada Variasi I Kondisi Sagging

Pada gambar 19 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *bottom floor frame 72* sebesar 73.73 MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

c. Kondisi Hogging



Gambar 20. *Stress* pada Variasi I Kondisi Hogging

Pada gambar 20 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *bottom floor frame 72* sebesar 125.1 MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

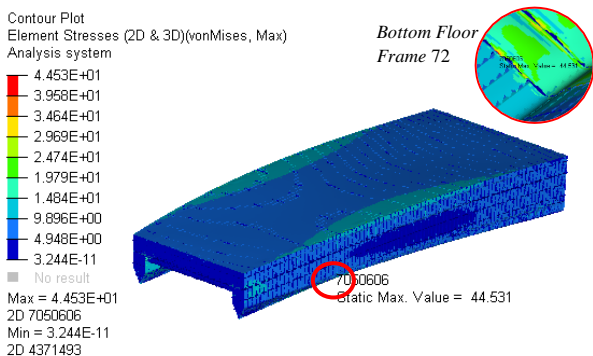
Dari seluruh hasil analisis respon struktur pada sistem konstruksi variasi I dirangkum dalam tabel 7.

Tabel 7. Rangkuman Hasil Analisis Variasi I

Kondisi	Stress (MPa)
Air tenang	44.6
Sagging	73.73
Hogging	125.1

3.4. Hasil Analisis Respon Struktur Sistem Konstruksi Variasi II

a. Kondisi Tenang

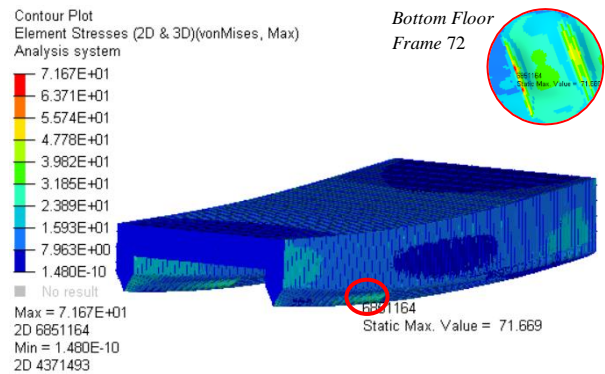


Gambar 21. *Stress* pada Variasi II Kondisi Air Tenang

Pada gambar 21 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *bottom floor frame 72* sebesar 44.53

MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

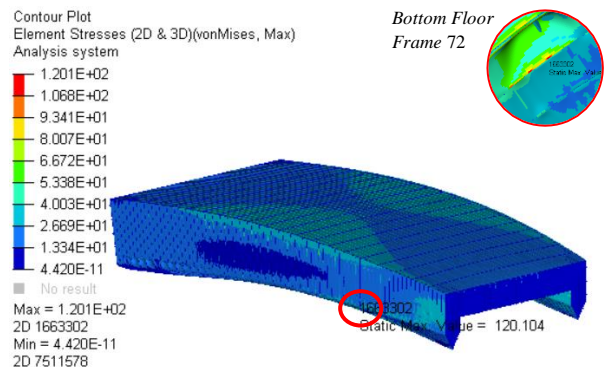
b. Kondisi Sagging



Gambar 22. *Stress* pada Variasi II Kondisi Sagging

Pada gambar 22 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *center girder frame 72* sebesar 71.67 MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

c. Kondisi Hogging



Gambar 23. *Stress* pada Variasi II Kondisi Hogging

Pada gambar 23 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *bottom floor frame 72* sebesar 120.1 MPa. Sehingga struktur masih mengalami deformasi elastis.

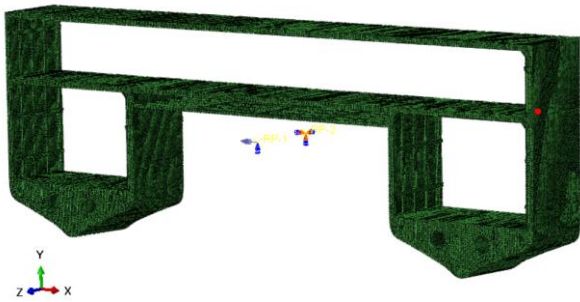
Dari seluruh hasil analisis respon struktur pada sistem konstruksi variasi II dirangkum pada tabel 8.

Tabel 8. Rangkuman Hasil Analisis Variasi II

Kondisi	Stress (MPa)
Air tenang	44.53
Sagging	71.67
Hogging	120.1

3.5. Analisis Kekuatan Batas

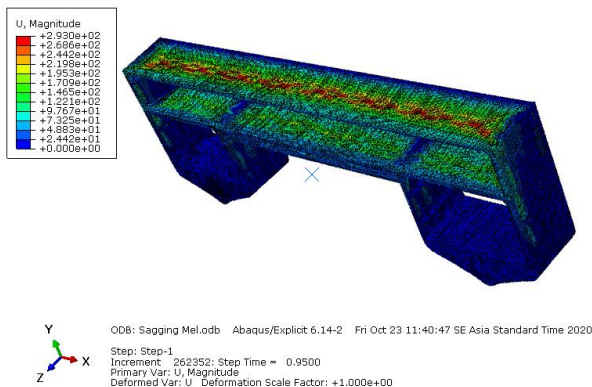
Pembebanan pada analisis kekuatan batas menggunakan proses peningkatan beban dan menggunakan dua jenis kontrol beban yaitu kontrol kelengkungan menggunakan *rigid-link* pada kedua sisi ujung model dan beban momen lentur (*sagging*(-) & *hogging*(+)) yang diletakkan pada titik independen satu ujung dan ujung lainnya di *full-constrain* tanpa diberikan beban [10] seperti pada gambar 24 untuk mendapatkan nilai momen lentur maksimum yang terjadi pada kapal saat kondisi *sagging* dan *hogging*.



Gambar 24. Permodelan Pembebanan Analisis Kekuatan Batas

3.6. Hasil Analisis Kekuatan Batas Sistem Konstruksi Variasi I

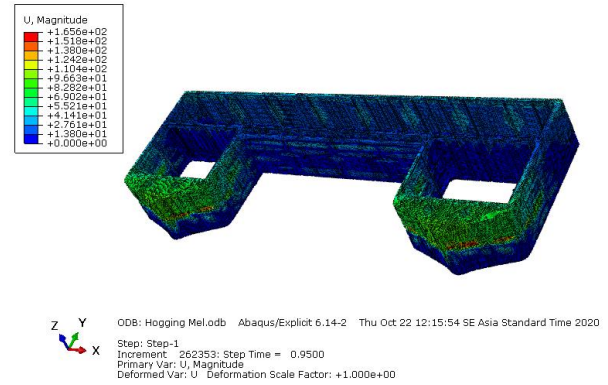
a. Kondisi *Sagging*



Gambar 25. Kekuatan Batas *Hull Girder* Variasi I Kondisi *Sagging*

Pada gambar 25 diketahui bahwa nilai tegangan *ultimate* kondisi *sagging* yang dialami struktur sebesar 409.3 MPa. Pada daerah *bottom* yang mengalami tarik sementara bagian *deck* mengalami tekanan. Sehingga struktur mengalami deformasi plastis.

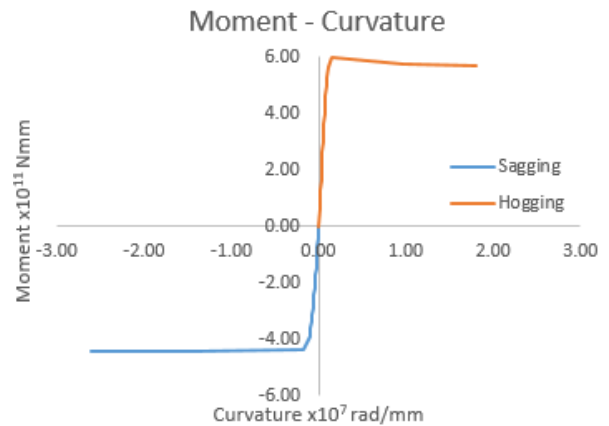
b. Kondisi *Hogging*



Gambar26. Kekuatan Batas *Hull Girder* Variasi I Kondisi *Hogging*

Pada gambar 26 diketahui bahwa nilai tegangan *ultimate* kondisi *hogging* yang dialami struktur yaitu sebesar 428.5 MPa. Pada daerah *deck* yang mengalami tarik sementara bagian *bottom* mengalami tekanan. Sehingga struktur mengalami deformasi plastis.

c. Grafik *Moment-Curvature*

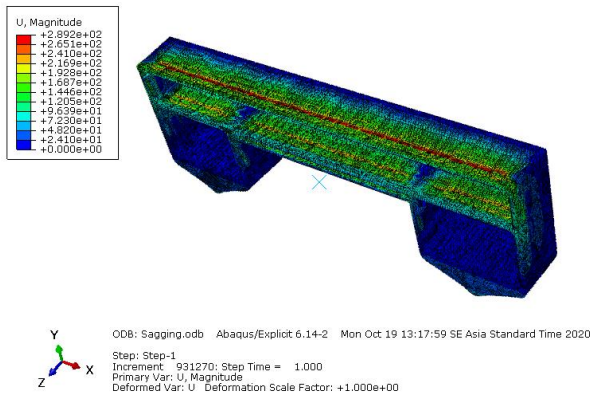


Gambar27. Kurva Hubungan *Moment-Curvature*

Kurva pada gambar 27 menjelaskan struktur mengalami kegagalan (*collapse*) pada saat momen lentur batas kondisi *hogging* sebesar 5.970×10^{11} Nmm dan pada saat momen lentur batas kondisi *sagging* sebesar -4.440×10^{11} Nmm. Kondisi kegagalan pada dua kondisi tersebut telah melebihi kriteria maksimum momen lentur *rules* yang dapat diterima kapal pada tabel 13 .

3.7. Hasil Analisis Kekuatan Batas Sistem Konstruksi Variasi II

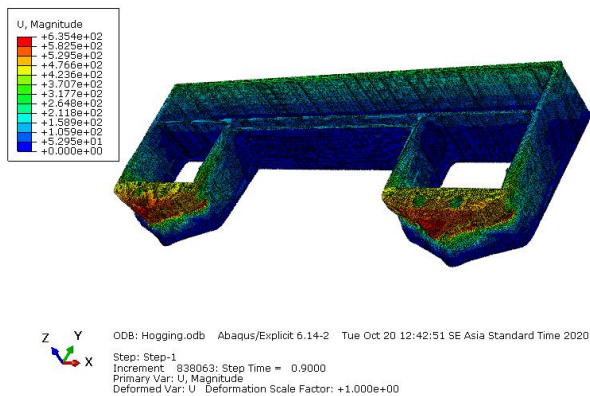
a. Kondisi *Sagging*



Gambar 28. Kekuatan Batas *Hull Girder* Variasi II Kondisi *Sagging*

Pada gambar 28 diketahui bahwa nilai tegangan *ultimate* kondisi *sagging* yang dialami struktur yaitu sebesar 442.3 MPa. Pada daerah *bottom* yang mengalami tarik sementara bagian *deck* mengalami tekanan. Sehingga struktur mengalami deformasi plastis.

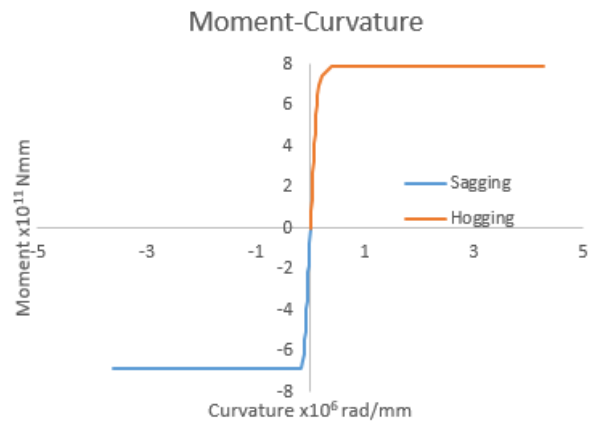
b. Kondisi *Hogging*



Gambar 29. Kekuatan Batas *Hull Girder* Variasi II Kondisi *Hogging*

Pada gambar 29 diketahui bahwa nilai tegangan *ultimate* kondisi *hogging* yang dialami struktur yaitu sebesar 465.1 MPa. Pada daerah *deck* yang mengalami tarik sementara bagian *bottom* mengalami tekanan. Sehingga struktur mengalami deformasi plastis.

c. Grafik *Moment-Curvature*



Gambar 30. Kurva Hubungan *Moment-Curvature*

Kurva pada gambar 30 menjelaskan struktur mengalami kegagalan (*collapse*) pada saat momen lentur batas kondisi *hogging* sebesar 7.910×10^{11} Nmm dan pada saat momen lentur batas kondisi *sagging* sebesar -6.840×10^{11} Nmm. Kondisi kegagalan pada dua kondisi tersebut telah melebihi kriteria maksimum momen lentur *rules* yang dapat diterima kapal pada tabel 13.

3.8. Validasi *Model*

Validasi *model* dilakukan dengan membandingkan hasil analisis defleksi pada *fem* dari geometri yang telah dimodelkan menggunakan *software finite element* dengan metode perhitungan manual rumus defleksi balok. Dengan perhitungan sebagai berikut :

a. Hasil Perhitungan Manual

Rumus perhitungan defleksi pada persamaan (7) yaitu sebagai berikut :

$$Defleksi = \frac{F x L^3}{3 x E x I} \quad (7)$$

F yaitu *Force* (N) sebesar 10000 N, L adalah panjang *model* (mm) sebesar 67200 mm, E adalah modulus elastisitas (Mpa) sebesar 200000 Mpa, dan I adalah inersia (mm⁴) dengan variasi I sebesar 1.15465×10^{13} mm⁴ dan variasi II sebesar 1.15652×10^{13} mm⁴. Hasil perhitungan sebagai berikut.

Variasi I

$$= \frac{10000 \times 67200^3}{3 \times 200000 \times (1.15465 \times 10^{13})}$$

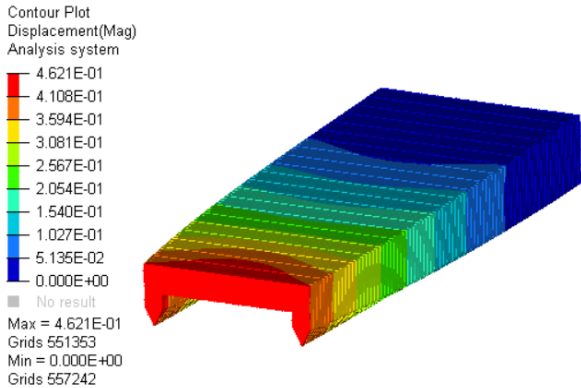
$$= 0,43803 \text{ mm}$$

Variasi II

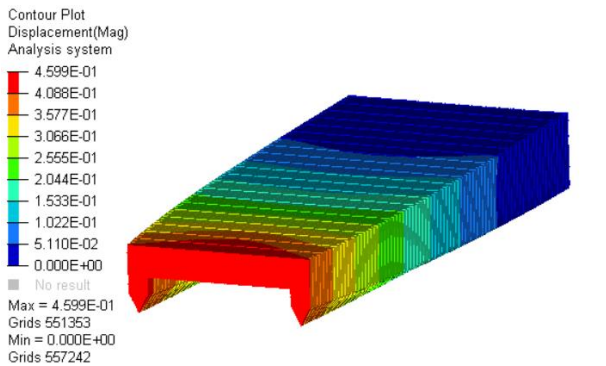
$$= \frac{10000 \times 67200^3}{3 \times 200000 \times (1.15652 \times 10^{13})}$$

$$= 0,43732 \text{ mm.}$$

b. Hasil Analisis Software



Gambar 31. Defleksi pada Sistem Konstruksi Variasi I



Gambar 32. Defleksi pada Sistem Konstruksi Variasi II

Hasil analisis defleksi menggunakan *software* mendapatkan hasil defleksi pada variasi I yang terdapat pada gambar 31 sebesar 0.46 mm dan defleksi pada variasi II yang terdapat pada gambar 32 sebesar 0.459 mm.

Tabel 9. Validasi Hasil dan Rumus

	Hasil Analisis Software (mm)	Hasil Perhitungan Manual (mm)	Error
Variasi I	0.46	0,43803	4.77 %
Variasi II	0.459	0,43732	4.73 %

Berdasarkan hasil perbandingan pada tabel 9 antara perhitungan manual sesuai rumus dengan analisis menggunakan *software*, didapatkan persentase *error* sebesar 4.77% & 4.73%. Dapat disimpulkan bahwa persentase *error* masih

dibawah 10% dan dapat dikatakan bahwa geometri sudah valid dan hanya terjadi deformasi elastis.

3.9. Tegangan Izin

Tegangan ijin bertujuan untuk memprediksi besarnya tegangan (*stress*) yang terjadi pada struktur tidak melebihi tegangan (*stress*) batas. Pada persamaan (8) mengacu pada *Lloyd Register (LR) : Rules and Regulation for the classification of special service craft, Part 6 : Multi Hull Construction in steel. Chapter 6, 2.2*[9]

$$\sigma_p = fogh \times \sigma_s \quad (8)$$

Dimana σ_p adalah tegangan ijin dalam MPa, σ_s , adalah *yield strength* dari material, *fogh* adalah koefisien batas tegangan lengkung badan kapal. Untuk menentukan persamaan *fogh* dapat dicari berdasarkan Tabel 10.

Tabel 10. Koefisien Tegangan Ijin
Limiting Stress Coefficient

<i>Operational mode of craft</i>	<i>fogh</i>
$\Gamma \geq 3.0$ atau $\Delta \leq 0.004$ (LRB)1.5	0,80 η_{HTS}
$\Gamma < 3.0$ atau $\Delta > 0.004$ (LRB)1.5	0,72 η_{HTS}

$$\Gamma = \text{Taylor quotient}$$

$$= \frac{v}{\sqrt{twl}} \quad (9)$$

$$= \frac{17 \text{ knots}}{\sqrt{93.72}} = 1.756$$

$$fogh = \text{Limiting stress coefficient}$$

Tabel 11. Nilai η_{HTS}

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

Berdasarkan tabel 11, didapatkan persamaan :

$$\sigma_p = 0,72 \eta_{HTS} \times \sigma_s \quad (10)$$

Dari perhitungan pada persamaan (9) dan (10) dihasilkan tegangan ijin sebesar 169.2 MPa.

Tabel 12. Validasi Hasil Tegangan terhadap Tegangan Ijin

Kondisi	σ maks (Mpa)	Kriteria	
		Tegangan Ijin LR Rules (Mpa)	Ket
Variasi I			
Air tenang	44.6	169.2	Ok
<i>Sagging</i>	73.73	169.2	Ok
<i>Hogging</i>	125.1	169.2	Ok
Variasi II			
Air tenang	44.53	169.2	Ok
<i>Sagging</i>	71.67	169.2	Ok
<i>Hogging</i>	120.1	169.2	Ok

Pada tabel 12 dapat disimpulkan bahwa semua tegangan hasil analisis respon struktur memenuhi kriteria tegangan ijin *rules*.

3.10. Perhitungan Kekuatan Batas

Kriteria *ultimate longitudinal bending moment* sebelum terjadinya deformasi plastis pada kapal menggunakan persamaan (11) berdasarkan *Lloyd Register Rules and Regulation for The classification of Special Craft 2019. Part 5*[9]

$$M_{MW} = F_f D_f S_f G_f E_f C_{WP} L_s^{2.5} B_M \text{ KNm} \quad (11)$$

M_{MW} adalah *maximum longitudinal bending moment*, F_f adalah -1,0 untuk *sagging* dan 1 untuk kondisi *hogging*, D_f adalah 1 pada lokasi panjang antara 0.4 LR dan 0.65 LR dari titik AP CWP adalah koefisien *waterplan area*, G_f adalah *service group factor*, S_f adalah 1,1 *for passenger and cargo craft*, E_f adalah 0,125 untuk momen lentur *sagging* dan 0,2 untuk momen lentur *hogging*, B_M adalah lebar maksimal kapal (m), L_s adalah 0.97 L_{pp} (m).

Didapat nilai maksimum momen lentur pada kondisi *sagging* adalah -1.808×10^{11} Nmm dan pada kondisi *hogging* adalah 2.893×10^{11} Nmm.

Tabel 13. Hasil Longitudinal Vertical Bending moment terhadap Design Longitudinal Vertical Bending Moment Rules

Kondisi	Bending Moment Result x 10 ¹¹ (Nmm)	Design Bending Moment Rules x 10 ¹¹ (Nmm)	Ket
<i>Sagging</i>	-4.440	-1.808	Ok
<i>Hogging</i>	5.970	2.893	Ok
Variasi II			
<i>Sagging</i>	-6.840	-1.808	Ok
<i>Hogging</i>	7.910	2.893	Ok

Berdasarkan rangkuman hasil analisis kekuatan batas pada tabel 13, momen lentur dari hasil analisis yang didapat telah memenuhi kriteria *LR Rules*.

3.11. Perhitungan Massa Konstruksi

Pada tabel 14, dilakukan perhitungan masa pada masing-masing sistem konstruksi *hull* yang dimodelkan.

Tabel 14. Perhitungan Massa Konstruksi

Jenis	Massa Total Konstruksi (Ton)
Variasi I	971.293
Variasi II	962.442

Sistem konstruksi variasi I memiliki massa lebih berat 0.91% dibanding sistem konstruksi variasi II dengan perbedaan 8.851 ton. Dari segi efisiensi jelas akan mempengaruhi dalam segi biaya yang harus dikeluarkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kedua variasi sistem konstruksi yang dirancang memenuhi kriteria *minimum section modulus LR Rules*. Pada perhitungan massa sistem konstruksi *hullform* yang dimodelkan, masa sistem konstruksi variasi II memiliki massa 8.851 ton atau 0.91% lebih ringan dibanding dengan sistem konstruksi variasi I.

Pada hasil analisis respon struktur, tegangan yang terjadi pada kedua sistem konstruksi masih memenuhi persyaratan tegangan yang diatur dalam *LR Rules*. Dengan hasil tegangan yang terjadi pada sistem konstruksi variasi II lebih kecil dibanding dengan sistem konstruksi variasi I dengan presentase 0.15% pada air tenang, 2.87% pada kondisi *sagging*, dan 4.16 % pada kondisi *hogging*.

Tegangan maksimum yang terjadi pada analisis respon struktur terjadi pada sistem konstruksi variasi I pada kondisi *hogging* yaitu sebesar 125.1 MPa dan pada analisis kekuatan batas, sistem konstruksi variasi I pada kondisi momen lentur *sagging* paling cepat mengalami deformasi plastis dengan tegangan *ultimate* sebesar 409.3 MPa.

Pada hasil analisis kekuatan Batas (*ultimate strength*), konstruksi variasi I lebih cepat mengalami kegagalan dibanding dengan konstruksi variasi II yaitu pada variasi I kondisi momen lentur *sagging* dengan momen maksimum sebesar 4.44×10^{11} Nmm dan momen lentur *hogging*

dengan momen maksimum sebesar 5.97×10^{11} Nmm.

Dari semua hasil analisis dan perhitungan, dapat disimpulkan bahwa sistem konstruksi variasi II lebih baik dan lebih direkomendasikan untuk digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat bersyukur atas nikmat, rahmat dan karunia Allah SWT, dan sangat berterima kasih kepada kedua Orangtua dan Keluarga yang telah mendukung secara penuh, civitas akademik Departemen Teknik Perkapalan, dan teman-teman semua yang telah membantu dalam penelitian tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Ilham, A. F. Zakki, and D. Chrismianto, "Studi Perancangan Fish Processing Vessel dengan Bentuk Lambung Catamaran untuk Perairan Indonesia," *Tek. Perkapalan*, vol. 7, No.4, pp. 449–459, 2019.
- [2] A. N. Juneva, A. F. Zakki, and M. Iqbal, "Analisa Kekuatan Cross Deck Terhadap Perubahan Bentuk Variasi Haunch Pada Kapal Ikan Katamaran Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Tek. Perkapalan*, vol. 5., no. 1, pp. 1–6, 2017.
- [3] S. E. Heggelund, T. Moan, and S. Oma, "Transverse strength analysis of catamarans," *Mar. Struct.*, vol. 13, no. 6, pp. 517–535, 2000, doi: 10.1016/S0951-8339(00)00059-9.
- [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] C. Wang, J. Wu, and D. Wang, "Experimental and numerical investigations on the ultimate longitudinal strength of an ultra large container ship," *Ocean Eng.*, vol. 192, no. May, p. 106546, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106546.
- [6] Y. Lee, N. Whitea, Z. Wang, and J.-B. Park, "Whipping Responses and Whipping Effects on Design Bending Moments of a Large Container Ship," *Hydroelasticity Mar. Technol. 2012 Tokyo, JAPAN*, no. March 2015, pp. 1–12, 2012.
- [7] M. C. Xu, Z. J. Song, and J. Pan, "Study on influence of nonlinear finite element method models on ultimate bending moment for hull girder," *Thin-Walled Struct.*, vol. 119, no. June, pp. 282–295, 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.06.009.
- [8] E. Utomo, "Perbandingan Desain Dermaga Terapung Pada Sistem Konstruksi Melintang dan Memanjang "Studi Kasus Dermaga Pelabuhan Tideng Pale Kabupaten Tana Tidung," vol. 2, 2018.
- [9] LR Lloyd Register, *Rules and Regulations for The classification of Special Service Craft*, no. 3. 2019.
- [10] T. Rizkiani, "Laporan Tugas Akhir Analisa Kekuatan Batas Kapal VLCC," Gowa, 2018.
- [11] T. Okawa, Y. Sumi, and M. Mohri, "Simulation-based fatigue crack management of ship structural details applied to longitudinal and transverse connections," *Mar. Struct.*, vol. 19, no. 4, pp. 217–240, 2006.