

**Article Info:**

Received 06 May 2026

Accepted 08 June 2026

Published 27 July 2026

Corresponding Author:

Khairunnisa

Department of Shipbuilding

Engineering

Shipbuilding Institute of

Polytechnic Surabaya

E-mail: -

© 2026 Khairunnisa et al.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license, allowing unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided proper credit is given to the original authors.



Optimization Analysis of Coal Transport Pontoon Design through Frame Spacing Modification Using the Finite Element Method

Analisis Optimasi Desain Ponton Pengangkut Batu Bara dengan Perubahan Jarak Gading Menggunakan Metode Elemen Hingga

Khairunnisa ^a, Priyambodo Nur Ardi Nugroho ^a, Kharis Abdullah ^a^a Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

Abstract

Material shortages caused by the pandemic have led to a surge in raw material prices, resulting in increased production costs. Therefore, optimization efforts are required to reduce production costs without compromising the structural quality of the pontoon. One optimization approach that can be applied is modifying the frame spacing. This study compares two frame spacing variations, 0.60 m and 0.65 m, against the initial design of 0.61 m to determine the most optimal configuration. Stress analysis for each structural model was conducted using software with a Finite Element Method (FEM) approach under three conditions: still water, sagging, and hogging. The results show that the structural profile with a frame spacing of 0.60 m has smaller dimensions compared to the 0.65 m spacing, due to a lower section modulus value. The stress analysis indicates that the highest allowable stress occurs under the sagging condition with a frame spacing of 0.61 m, reaching 84.8 MPa. The most optimal frame spacing is 0.60 m, which achieves a weight optimization of 5.3% and a cost reduction of 9.4%.

Keywords: Pontoon, Frame Spacing, Structural Optimization, Finite Element Method (FEM), Sagging, Hogging, Cost Efficiency

Abstrak

Kelangkaan material akibat pandemi telah menyebabkan lonjakan harga bahan baku yang berdampak pada meningkatnya biaya produksi. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimasi untuk menekan biaya produksi tanpa mengurangi kualitas konstruksi ponton. Salah satu metode optimasi yang dapat diterapkan adalah dengan memodifikasi jarak gading. Penelitian ini membandingkan dua variasi jarak gading, yaitu 0,60 m dan 0,65 m, terhadap desain awal 0,61 m untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal. Analisis tegangan pada setiap model konstruksi dilakukan menggunakan perangkat lunak dengan menggunakan pendekatan Finite Element Method (FEM) pada tiga kondisi, yaitu air tenang, sagging, dan hogging. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa profil konstruksi dengan jarak gading 0,6 m memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan dengan jarak gading 0,65 m, disebabkan oleh nilai modulus yang lebih rendah. Analisis tegangan memperlihatkan bahwa tegangan ijin tertinggi terjadi pada kondisi sagging dengan jarak gading 0,61 m, dengan nilai 84,8 MPa. Adapun jarak gading yang paling optimal adalah 0,6 m, yang mampu menghasilkan optimasi berat sebesar 5,3% dan penghematan biaya sebesar 9,4%.

Kata Kunci: Ponton, Jarak gading, Optimasi Konstruksi, Finite Element Method (FEM), Sagging, Hogging, Efisiensi biaya

1. Pendahuluan

Pandemi COVID-19 memberikan dampak signifikan terhadap kelancaran distribusi perdagangan, baik pada tingkat nasional maupun internasional. Kondisi tersebut menyebabkan keterbatasan pasokan material

pada berbagai sektor industri, termasuk industri perkapalan. Salah satu sektor yang terdampak adalah pembangunan konstruksi ponton untuk kegiatan bongkar muat batu bara yang umumnya menggunakan material utama berupa baja tahan korosi, beton bertulang, dan High-Density Polyethylene (HDPE) (Sundari et al., 2020). Ponton atau tongkang merupakan alat apung yang hanya digunakan untuk membawa muatan di atas geladak, tidak memiliki awak maupun sistem penggerak sendiri, serta memiliki nilai block coefficient berkisar antara 0,9 hingga 1. Dalam pembangunan konstruksi ponton di Indonesia, sebagian besar bahan baku, khususnya baja berkualitas tinggi, masih bergantung pada impor karena keterbatasan kemampuan industri lokal dalam memenuhi standar teknis internasional. Ketergantungan tersebut menyebabkan kenaikan harga material selama pandemi yang berdampak langsung terhadap meningkatnya biaya produksi akibat kelangkaan bahan.

Ponton atau barge merupakan kapal muatan curah tanpa sistem penggerak yang banyak digunakan dalam industri pengangkutan batu bara (Utomo, 2018). Secara umum, ponton memiliki bentuk menyerupai balok karena mempunyai koefisien blok sebesar 0,9 atau lebih, serta tidak dilengkapi lubang palka maupun awak kapal (Arswendo & Arifin, 2011). Perkembangan teknologi saat ini menyebabkan fungsi ponton menjadi semakin beragam, mulai dari pengangkutan berbagai jenis muatan hingga pemanfaatannya sebagai dermaga apung. Dalam kondisi pandemi, kelangkaan material menjadi salah satu permasalahan utama pada pembangunan ponton sehingga diperlukan strategi penghematan material tanpa mengurangi kekuatan struktur kapal.

Sebagai langkah adaptasi terhadap keterbatasan pasokan material tersebut, salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah melakukan modifikasi pada desain konstruksi ponton, khususnya melalui perubahan jarak gading untuk menghasilkan desain alternatif yang lebih optimal. Gading merupakan bagian struktur kapal tempat kulit kapal diletakkan, dengan penamaannya disesuaikan berdasarkan posisi gading tersebut (Miliniati dan Setyawan, 2021). Setiap gading memiliki jarak tertentu yang disebut jarak gading, yang menurut Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) diukur dari tepi cetakan ke tepi cetakan bingkai (Biro Klasifikasi Indonesia, 2021). Berdasarkan ketentuan tersebut, jarak gading maksimum yang dapat digunakan adalah sebesar 0,656 m, sehingga dalam penelitian ini digunakan dua variasi jarak gading, yaitu 0,60 m dan 0,65 m, untuk menemukan konfigurasi desain yang paling optimal.

Perubahan jarak gading akan memengaruhi kekuatan struktur kapal karena gaya dan momen yang bekerja pada struktur dapat menimbulkan efek tekukan (deflection) serta menghasilkan tegangan normal maupun geser pada penampang melintang kapal. Dalam analisis struktur, tegangan Von Mises digunakan sebagai parameter untuk memprediksi tingkat keluluan material akibat pembebanan. Selain itu, tegangan ijin juga digunakan sebagai batas maksimum tegangan kerja yang dapat diterima oleh suatu struktur. Nilai tegangan ijin berbeda untuk setiap material tergantung pada faktor material yang digunakan. Berdasarkan BKI Vol. II Sec. 2, material struktur lambung kapal umumnya memiliki faktor material $k = 1$ dengan nilai yield stress minimum sebesar 235 MPa dan tensile strength sebesar 400–520 MPa (Biro Klasifikasi Indonesia, 2021).

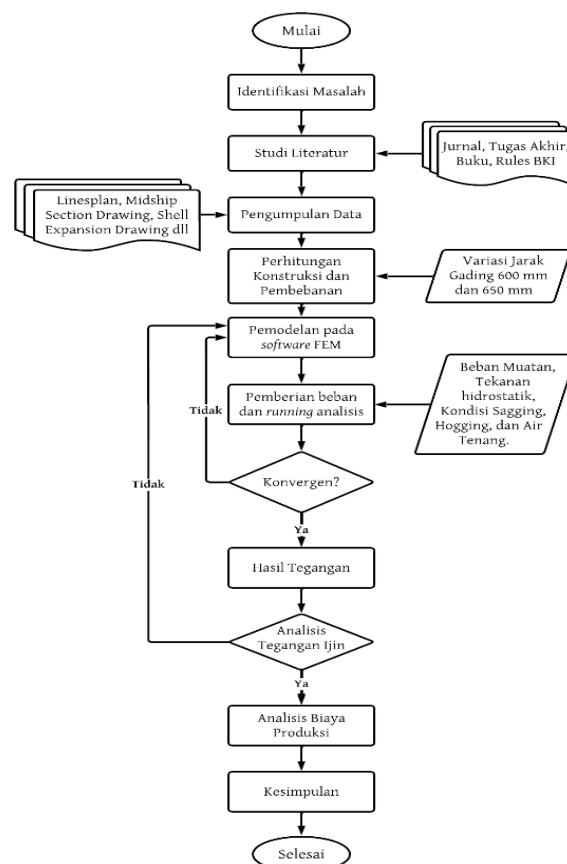
Kondisi pembebanan pada struktur ponton dipengaruhi oleh kondisi operasional di laut, seperti kondisi air tenang, sagging, hogging, dan tekanan hidrostatik. Berdasarkan BKI Vol. II Sec. 5 B.2, beban global pada lambung kapal dipengaruhi oleh momen lentur dan gaya geser akibat kondisi air tenang maupun gelombang pada kondisi kapal utuh maupun kondisi kerusakan (Biro Klasifikasi Indonesia, 2021). Kondisi sagging terjadi ketika puncak gelombang berada di bagian ujung kapal sehingga kapal mengalami tekukan ke bawah, sedangkan kondisi hogging terjadi ketika puncak gelombang berada di midship kapal sehingga kapal mengalami tekukan ke atas. Selain itu, tekanan hidrostatik juga memberikan pengaruh terhadap struktur karena tekanan fluida meningkat seiring bertambahnya kedalaman akibat gaya gravitasi. Untuk memastikan bahwa desain alternatif hasil modifikasi jarak gading memiliki performa yang setara atau lebih baik dibanding desain awal, diperlukan analisis struktur menggunakan metode elemen hingga atau Finite Element Method (FEM). Metode elemen hingga telah digunakan sejak tahun 1940 untuk menyelesaikan berbagai permasalahan analisis struktur dan saat ini berkembang luas pada bidang aliran fluida, perpindahan panas, dan elastisitas (Argo & Prasetyo, 2020). Prinsip dasar metode ini adalah melakukan pendekatan penyelesaian masalah menggunakan informasi pada titik simpul (node) (Rosyadi, 2021). Proses analisis FEM umumnya terdiri atas tiga tahapan, yaitu preprocessing yang meliputi pemilihan material, pemodelan struktur, dan meshing, kemudian tahap solution yang mencakup penentuan beban dan gaya yang bekerja pada objek, serta tahap postprocessing yang digunakan untuk mengevaluasi hasil analisis berupa distribusi tegangan, deformasi, dan identifikasi area kritis pada struktur.

Penelitian ini menggunakan ponton pengangkut batu bara dengan panjang 91,5 meter dan jarak gading awal sebesar 0,61 meter yang kemudian dimodifikasi menjadi 0,60 meter dan 0,65 meter. Variasi tersebut

digunakan untuk menganalisis pengaruh perubahan jarak gading terhadap kekuatan struktur serta efisiensi biaya konstruksi. Setiap variasi dianalisis menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada struktur ponton dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan berupa air tenang, sagging, hogging, dan tekanan hidrostatik (Rahman et al., 2020). Selain itu, dilakukan pula analisis kebutuhan material untuk menentukan konfigurasi yang memberikan optimasi terbaik dari aspek kekuatan struktur maupun efisiensi penggunaan material. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan desain konstruksi ponton yang lebih ekonomis, efisien, dan tetap memenuhi standar keselamatan konstruksi kapal.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan tahapan terstruktur untuk menganalisis kekuatan konstruksi ponton dari hasil memodifikasi jarak gading. Metode yang digunakan adalah metode FEM untuk menganalisis kekuatan dari ponton setelah jarak gading dimodifikasi. Proses metodologi diawali dengan identifikasi masalah, kemudian studi literatur sampai selesai. Adapun alur dari penelitian disajikan pada Gambar 1 yang berupa diagram alir.



Gambar 1. Diagram Alir

Prosedur awal pada kajian ini adalah mengidentifikasi suatu permasalahan. Kelangkaan bahan material pada saat kondisi pandemi menjadi suatu permasalahan bagi industri perkapalan. Kondisi tersebut mengakibatkan biaya produksi menjadi naik. Selanjutnya untuk studi literatur sendiri berfungsi membantu dalam menetapkan dasar teori serta mengidentifikasi variabel-variabel penting yang menjadi fokus analisis. Pengumpulan data dalam kajian ini dilakukan agar objek permodelan yang dibuat dapat memperoleh hasil yang akurat. Sumber data diperoleh dari PT Dok dan Perkapalan Surabaya. Adapun data yang dibutuhkan antara lain, ukuran utama, *Linesplan*, *Midship Section Drawing*, *Shell Expansion Drawing*, harga material dan *Material List*.

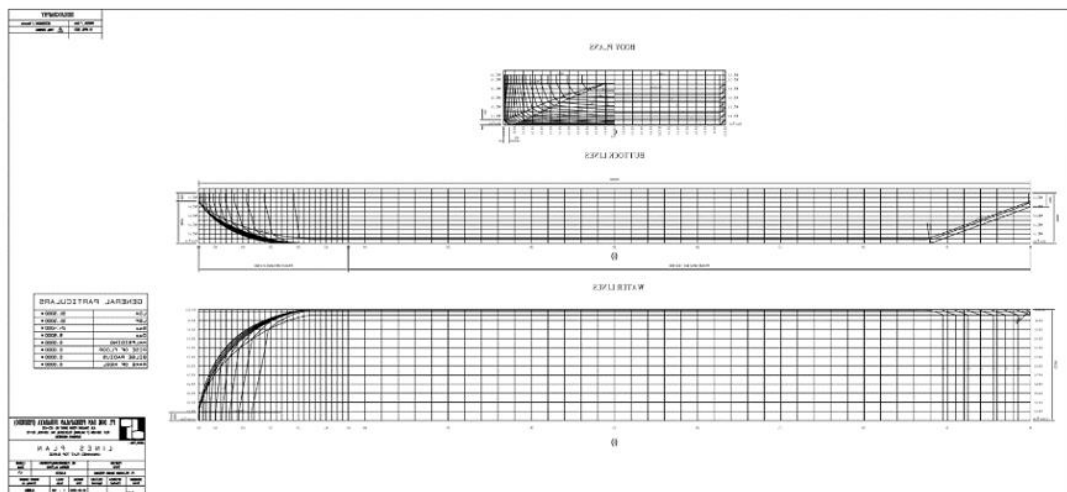
Prosedur selanjutnya adalah perhitungan konstruksi, guna untuk menemukan ukuran profil dan tebal plat yang sesuai dengan variasi jarak gading yang ditentukan. Setelah proses perhitungan konstruksi selesai dilanjutkan dengan penggambaran konstruksi di software drawing. Dilakukan pula perhitungan beban mulai dari beban muatan, tekanan hidrostatik hingga momen lengkung. Kajian ini tidak memodelkan

kapal secara utuh namun mengambil bagian midship kapal, hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya crash saat melakukan analisis. Setelah proses meshing selesai dilakukan pemberian beban dan gaya-gaya yang terjadi di sekitar ponton. Pada kondisi ini juga diberikan pengondisian beban saat kondisi air tenang, *sagging* dan *hogging*. Setelah hasil tegangan didapatkan dilakukan analisis apakah tegangan yang dihasilkan masih masuk ke dalam tegangan ijin dari BKL. Hasil ini akan memperlihatkan apakah variasi jarak gading tersebut dapat diterima klasifikasi atau tidak. Setelah itu dilakukan analisis biaya Material untuk memperlihatkan perbedaan biaya material dari tiap variasi desain.

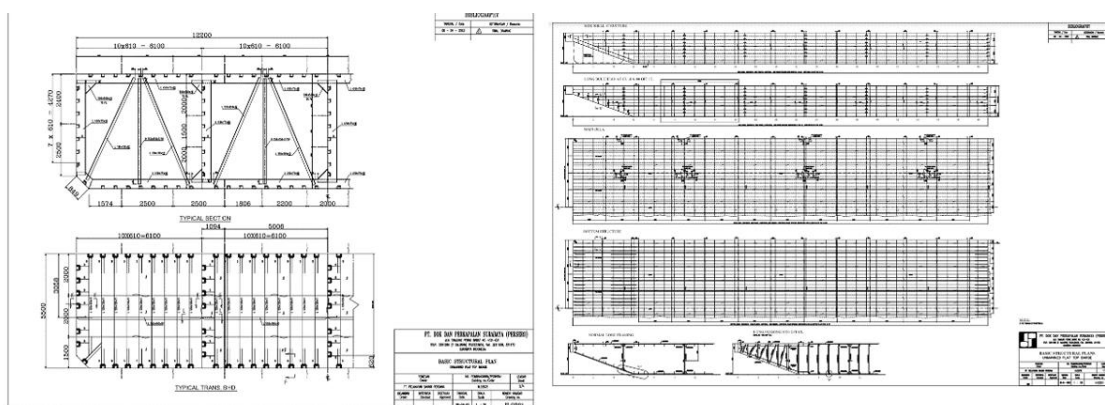
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Dimensi Kapal Ponton

Pemahaman secara detail mengenai dimensi fisik kapal pada tahap awal menjadi sangat penting, sebagai dasar dari seluruh proses simulasi dan analisis yang akan dilakukan. Kapal Ponton yang digunakan dalam studi ini memiliki dimensi utama sebagai berikut: Length Overall (LOA) sebesar 91,5 meter, Length Between Perpendiculars (LPP) 91,5 meter, Beam (B) atau lebar kapal 24,4 meter, Draft (T) atau kedalaman lambung kapal 5,5 meter. Dimensi tersebut merupakan parameter utama yang menggambarkan bentuk dan proporsi ponton secara keseluruhan. Pemodelan ponton dilakukan menggunakan software Maxsurf Modeler dan, adapun gambar *lines plan* dan detail kontruk ponton dari ponton disajikan pada Gambar 2.



(a)



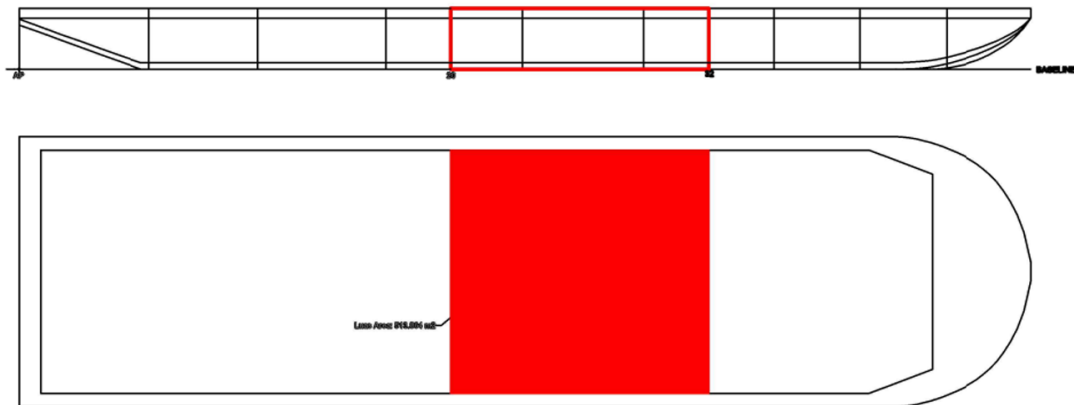
(b)

Gambar 2 (a) *lines plan* ponton, (b) kontruksi ponton

3.2. Pembagian Ukuran Model

Model kapal ponton tidak dibuat secara keseluruhan kapal, tetapi hanya analisis sebagian kapal. Menurut DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.7 Sec 3 analisis sebagian bagian kapal juga dapat dijadikan penilaian untuk *scantling longitudinal hull girder*, *bulkhead* dan penopang konstruksi utama, sehingga hasil analisis masih dapat dijadikan acuan. Model yang akan diuji juga dibuat sepanjang 2 cargo hold dengan posisi $\frac{1}{2}$ cargo hold di bagian depan, 1

cargo hold di tengah dan $\frac{1}{2}$ cargo hold di belakang, hal ini mengacu pada BKI *Analysis Techniques Strength*. Adapun ilustrasi posisi dari tiap model di tiap ukuran jarak gading dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Posisi Model di tiap Jarak Gading

3.3. Perhitungan Konstruksi

Perhitungan konstruksi mengacu pada BKI Vol II, dimana perhitungan ini dimulai dari penentuan ukuran utama kapal hingga menghitung modulus dari tiap bagian profil, bracket dan plat kapal. Perhitungan dilakukan dua kali perhitungan karena adanya dua versi jarak gading yang direncanakan. Detail profil dan bracket yang digunakan tiap model beserta modulus nya dapat dilihat pada Tabel 1 untuk konstruksi desain lama dan Tabel 2 dan 3 untuk konstruksi desain baru dengan jarak gading 0,6 m dan 0,65 m.

Tabel 1. Ukuran Profil Jarak Gading 0.61

List	Jenis Profil	Ukuran Profil
Pembujur Alas	L	120x120x11
Pembujur Geladak	L	120x120x11
Pembujur Sisi	L	120x120x11
Gading Besar	L	450x75x10
Strut daerah A Profil L	L	130x130x12
Strut daerah A Profil H	H	150x150x7/10
Penegar Bulkhead daerah A dan M	L	120x120x11
Senta Bulkhead daerah A	L	300x75x10
Strut daerah M Profil L	L	130x130x12
Strut daerah M Profil H	H	150x150x7/10
Senta Bulkhead daerah M	L	550x100x10
Strut daerah F Profil L	L	130x130x12
Strut daerah F Profil H	H	150x150x7/10
Penegar Bulkhead daerah F	L	130x130x9
Senta Bulkhead daerah F	L	600x100x10

Tabel 2. Ukuran Profil Jarak Gading 0.65 m

a. Bagian Belakang

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur Alas	L	99,38	150x90x12
Pembujur Geladak	L	78,26	150x90x9
Pembujur Sisi	L	100,69	150x90x12
Gading Besar Bagian Aft	T	1430,57	350x300x13x24
Strut daerah A Profil L	L	392,90	200x200x20
Strut daerah A Profil H	H	392,90	175x175x7x11
Penegar Bulkhead	L	170,75	150x150x15
Senta Bulkhead	L	71,15	150x90x12

b. Bagian Tengah

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur Alas	L	99,38	150x90x12
Pembujur Geladak	L	78,26	150x90x9
Pembujur Sisi	L	100,69	150x90x12
Gading Besar Bagian Middle	T	1256,50	350x300x13x24
Strut daerah M Profil L	L	339,57	200x200x20
Strut daerah M Profil H	H	339,57	175x175x7x11
Penegar Bulkhead	L	170,51	150x150x15
Senta Bulkhead	L	310.51	200x200x15

c. Bagian Depan

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur sisi	L	100,69	150x90x12
Transversal Deck	L	78.26	150x90x9
Transversal Bottom	L	99.38	150x90x12
Strut daerah F Profil L	L	162,7	150x150x15
Strut daerah F Profil H	H	162,7	200x100x5.5x8
Penegar Bulkhead	L	27.33	90x90x7
Senta Bulkhead L	L	524.88	250x250x25
Gading Besar Bagian Fore	T	628.35	250x200x10x16

Tabel 3. Ukuran Profil Jarak Gading 0.60 m

a. Bagian Belakang

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur Alas	L	53,52	125x75x10
Pembujur Geladak	L	42,16	100x75x10
Pembujur Sisi	L	54.22	125x75x10
Gading Besar Bagian Aft	T	1,320.53	350x300x13x24
Strut daerah A Profil L	L	362.67	200x200x15
Strut daerah A Profil H	H	362.67	250x125x6x9
Penegar Bulkhead	L	146.49	150x150x12
Senta Bulkhead	L	65.68	125x75x10

b. Bagian Tengah

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur Alas	H	53.52	125x75x10
Pembujur Geladak	L	42.15	100x75x10
Pembujur Sisi	L	54.22	125x75x10
Gading Besar Bagian Middle	T	1,159.85	175x350x12x19
Strut daerah M Profil L	L	313.45	200x200x15
Strut daerah M Profil H	H	313.45	248x124x5x8
Penegar Bulkhead	L	146.29	150x150x12
Senta Bulkhead	L	286.63	200x200x15

c. Bagian Depan

List	Jenis Profil	Modulus	Ukuran Profil
Pembujur sisi	L	54.22	125x75x10
Transversal Deck	L	42.15	100x75x10
Transversal Bottom	L	53.52	125x75x10
Strut daerah F Profil L	L	150.19	150x150x12
Strut daerah F Profil H	H	150.19	175x90x5x8
Penegar Bulkhead	L	23.37	90x90x7
Senta Bulkhead L	L	484.51	250x200x25
Gading Besar Bagian Fore	T	580.01	250x200x10x16

Pada Tabel 1 terlihat bahwa jarak gading 0.6 atau desain awal cenderung memakai profil L dan hampir seluruh bagian konstruksi, bahkan hingga membutuhkan profil L dengan ukuran custom seperti yang digunakan pada bagian gading besar. Pada desain baru dipertimbangkan untuk menggunakan profil T agar material lebih mudah untuk ditemui di pasaran. Kemudian dapat dilihat juga perbedaan ukuran profil yang terjadi karena perbedaan modulus dari tiap bagian. Desain dengan jarak gading 0.6 cenderung memiliki nilai modulus lebih rendah dibanding desain dengan jarak gading 0.65.

3.4. Perhitungan Beban Muatan

Beban muatan pada kapal ini diletakkan di atas dek kapal dan pemodelan ini diasumsikan bahwa beban merata. Perhitungan beban muatan kapal di mulai dari mendata total muatan kapal, dan menghitung luas area kargo kapal, dari hasil tersebut didapat tanggungan beban muat tiap meter persegi. Total beban tersebut diidentifikasi seberapa besar beban yang ditanggung tiap model berdasarkan luas area kargo pada tiap model. Adapun hasil nilai dari perhitungan beban disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Beban

Jarak Gading	Bagian	Area (m ²)	Pressure (N/m ²)
0,61	Tengah	482,24	12251,54
0,65	Tengah	513,86	13041,52
0,60	Tengah	474,34	12086,92

Berdasarkan dari hasil analisis perhitungan beban diperoleh nilai pressure tertinggi terdapat pada jarak gading 0,65. Area meningkat seiring bertambahnya **jarak gading**, karena jumlah dan ukuran frame mempengaruhi total permukaan struktur yang menerima beban. Semakin besar jarak gading, semakin sedikit jumlah frame, sehingga **satu panel area menjadi lebih luas** (efek penggandaan antar frame) seperti kenaikan dari 0.60 menjadi 0.61 m mengalami kenaikan 1.66% dan dari 0.61 menjadi 0.65 m mengalami kenaikan 6.57%. Semakin besar jarak gading, **semakin besar beban total yang harus ditahan bagian tengah**, karena per panel menanggung beban lebih luas.

3.5. Beban Momen Sagging, Hogging dan Air Tenang

Nilai beban momen lengkung diperoleh dari melakukan analisis kekuatan memanjang dengan menggunakan software *Maxsurf Stability*. Adapun kondisi gelombang disesuaikan dengan kondisi sagging, hogging dan air tenang. Saat pengaturan air tenang jenis gelombang yang dipilih adalah flat, untuk kondisi *sagging* dipilih gelombang sinusoidal dengan panjang gelombang sepanjang kapal dan wave phase satu, sementara untuk kondisi hogging sama seperti hogging hanya berbeda pada nilai phase offset yang bernilai setengah. Hasil analisis tersebut disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Momen Lengkung Sagging, Hogging dan Air Tenang

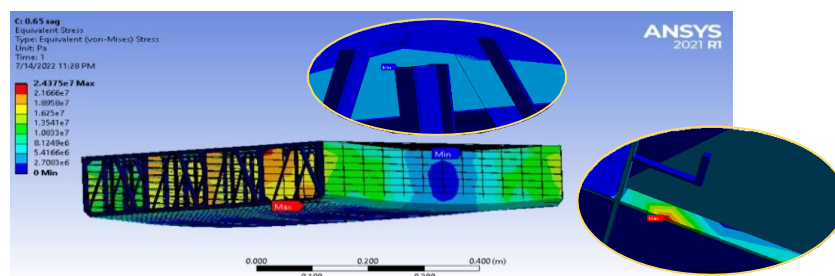
Modifikasi	Kondisi muatan	Bagian	Momen (ton.m)
Jarak Gading 0.61	Sagging	Frame 20	-39.712
		Frame 32	-31.59
	Hogging	Frame 20	4.664
		Frame 32	5.193
	Air Tenang	Frame 20	-18.955
		Frame 32	-14.874
Jarak Gading 0.60	Sagging	Frame 20	-38.778
		Frame 32	-32.988
	Hogging	Frame 20	5.034
		Frame 32	5.228
	Air Tenang	Frame 20	-18.29
		Frame 32	-15.564

Jarak Gading 0.65	Sagging	Frame 20	-43.267
		Frame 32	-26.254
	Hogging	Frame 20	4.235
		Frame 32	5.22
	Air Tenang	Frame 20	-20.273
		Frame 32	-11.693

Berdasarkan Tabel 5 diperoleh nilai momen pada saat kondisi *sagging*, *hogging*, dan air tenang. Modifikasi jarak gading 0,6 memiliki nilai momen (ton.m) terbesar daripada jarak gading 0,61 maupun yang jarak gadingnya 0,65. *Sagging* menghasilkan momen lentur terbesar (paling negatif) di kedua frame, terutama di Frame 20 untuk jarak gading 0,65 m. *Hogging* memiliki momen positif yang relatif kecil dan tidak terlalu dipengaruhi variasi jarak gading. *Air Tenang* menghasilkan momen negatif menengah, dengan tren perlambatan signifikan pada Frame 32 ketika jarak gading meningkat. Kondisi *sagging* memberikan beban lentur terbesar pada struktur dibanding *hogging* dan air tenang.

3.6. Uji Konvergensi

Simulasi Ansys dilakukan terlebih dahulu sebelum melakukan uji konvergensi. Tahapan awal adalah mengidentifikasi material yang dipakai, melakukan *meshing*, pemberian beban dan kondisi batas dan pemilihan *solution*. Setelah melakukan simulasi hasil tegangan untuk setiap model akan didapatkan, salah satu hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4. Uji konvergensi dilakukan nilai dari hasil tegangan diperoleh, untuk memastikan hasil keluaran dari analisis dapat dijadikan acuan. Hasil tegangan yang telah konvergen inilah yang akan dianalisis tegangan izinnnya. Hasil konvergensi salah satu model dapat dilihat pada Tabel 6.



Gambar 4. Hasil Simulasi Tegangan

Selanjutnya dilakukan uji konvergensi untuk memastikan nilai tegangan dapat dijadikan acuan. Proses konvergensi ini pada prinsipnya dilakukan dengan mengubah ukuran elemen pada model dan membandingkan hasil analisis tersebut dengan ukuran elemen lain, dari hal tersebut akan terlihat apakah hasil analisis mempunyai nilai yang stabil atau tidak. Adapun data hasil uji konvergensi seluruh model disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Analisis Tegangan Ijin

Kondisi	Hasil Tegangan (MPa)	Nilai Tegangan Ijin (MPa)	Status
Jarak Gading 0.6			
Kondisi Sagging	48.78	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Hogging	48.28	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Air Tenang	49.39	150	Lulus Kriteria BKI
Jarak Gading 0.61			
Kondisi Sagging	85.04	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Hogging	67.33	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Air Tenang	59.63	150	Lulus Kriteria BKI

Jarak Gading 0.65			
Kondisi Sagging	24.56	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Hogging	22.08	150	Lulus Kriteria BKI
Kondisi Air Tenang	24.53	150	Lulus Kriteria BKI

Berdasarkan Tabel 6. Diperoleh hasil analisis tegangan, bahwa semua nilai tegangan yang terjadi pada struktur **masih di bawah nilai tegangan ijin sebesar 150 MPa**, sehingga **semua kondisi lulus kriteria BKI (Biro Klasifikasi Indonesia)**. Namun, terdapat fluktuasi tegangan yang cukup signifikan tergantung **jarak gading dan kondisi beban (sagging, hogging, air tenang)**. Kenaikan jarak gading dari 0.6 menjadi 0.61 m menyebabkan lonjakan tegangan, terutama pada **kondisi sagging**. Kondisi ini mendukung pemahaman bahwa **struktur lebih rentan terhadap momen lentur negatif (sagging)** namun, saat jarak dinaikkan lagi menjadi 0.65 m, justru tegangan turun drastis. Hal ini bisa mengindikasikan bahwa redistribusi kekakuan, dan selain itu kemungkinan adanya penurunan beban akibat metode simulasi atau pembebanan.

3.7. Analisis Biaya

Perhitungan kebutuhan material dilakukan dengan menghitung total panjang profil dan luas area pelat yang dibutuhkan kemudian melakukan pencarian harga tiap profil dan pelat lewat katalog. Informasi seperti berat dan ukuran per satuannya terdapat di katalog, sehingga akan didapatkan total unit pembelian yang harus dilakukan untuk memenuhi kebutuhan profil satu kapal. Sedangkan dalam menghitung *bracket* dan pelat yang dilakukan adalah menghitung total area yang dipakai kemudian membaginya dengan total area pelat per satuannya sehingga di dapatkan total unit pelat yang harus di beli. Adapaun hasil dari biaya material tiap variasi jarak gading dapat di lihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Analisis Biaya Material		
Jarak Gading 0.6		
Bagian	Total Biaya	
Bagian Belakang	Rp	1,682,618,993.91
Bagian Middle	Rp	13,263,052,816.58
Bagian Depan	Rp	2,336,330,994.20
Total	Rp	17,282,002,804.69
Jarak Gading 0.61		
Bagian	Total Biaya	
Bagian Belakang	Rp	1,822,409,869.32
Bagian Middle	Rp	14,833,668,155.14
Bagian Depan	Rp	2,411,914,917.85
Total	Rp	19,067,992,942.32
Jarak Gading 0.65		
Bagian	Total Biaya	
Bagian Belakang	Rp	1,931,374,139.31
Bagian Middle	Rp	14,797,818,534.82
Bagian Depan	Rp	1,420,633,324.29
Total	Rp	18,149,825,998.41

Selain biaya material dilakukan juga perhitungan berat konstruksi di tiap variasi jarak gading. Berat konstruksi ini didapat dari penjumlahan total berat profil, pelat dan bracket yang datanya digunakan juga untuk menghitung biaya material. Hasil perhitungan berat dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis Berat Material	
Jarak Gading 0.6	
Bagian	Total Berat (ton)
Bagian Belakang	102.48
Bagian Middle	785.80
Bagian Depan	123.61
Total	1011.89

Jarak Gading 0.61	
Bagian	Total Berat (ton)
Bagian Belakang	101.74
Bagian Middle	823.77
Bagian Depan	136.23
Total	1061.74
Jarak Gading 0.65	
Bagian	Total Berat (ton)
Bagian Belakang	113.85
Bagian Middle	861.38
Bagian Depan	119.51
Total	1111.05

Berdasarkan hasil analisis diperoleh perbedaan berat profil yang cukup signifikan antara jarak gading 0.6 dan 0.65 membuat berat konstruksi di jarak gading 0.65 lebih berat walaupun dengan jumlah frame yang lebih sedikit dari jarak gading 0.6. Kemudian jarak gading 0.61 lebih berat dibanding jarak gading 0.6 karena profil yang digunakan pada jarak gading 0.61 lebih berat dibanding yang dipakai di jarak gading 0.6. Dari tabel biaya dan berat hasil paling optimal adalah jarak gading 0.6 dimana mempunyai berat konstruksi yang lebih ringan dan biaya material yang lebih rendah. Selanjutnya adapun Hasil optimasi tiap variasi jarak gading berdasarkan berat dan biaya material dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Persentase Perhitungan Berat			
Bagian		Selisih (ton)	Persentase
Jarak Gading 0.6		56.80	5.3%
Jarak Gading 0.65		-49.30	-4.6%
Biaya Material			
Bagian		Selisih	Persentase
Jarak Gading 0.6	Rp	1,785,990,137.63	9.4%
Jarak Gading 0.65	Rp	918,166,943.90	4.8%

Berdasarkan hasil perhitungan persentase perhitungan berat dngan biaya diperoleh bahwa jarak gading 0,65 memiliki nilai persentase yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan jarak gading 0,6.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis secara komprehensif kekuatan kontruksi ponton dengan perbedaan jarak gading. Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa perubahan ukuran profil pada jarak gading 0.6 m cenderung lebih kecil dibanding profil jarak gading 0.65 m hal ini disebabkan nilai modulus yang lebih kecil pada jarak gading 0.6 pada posisi yang sama. 2. Kondisi keadaan sekitar kapal saat sagging, hogging dan air tenang berpengaruh pada besar tegangan yang dialami kapal, terlihat dari perubahan nilai tegangan ijin yang terjadi di tiap kondisi. Nilai tegangan ijin tertinggi didapat dari kondisi sagging pada jarak gading 0.61 m dengan nilai 84.87 MPa. Selain itu analisis biaya didapatkan jarak gading paling optimal adalah jarak gading 0.6 dengan optimasi berat sebesar 5.3% dan optimasi biaya sebesar 9.4%.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik yang perlu dilaporkan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan masukan selama proses pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini. Penulis juga menyampaikan

apresiasi kepada para editor dan mitra bestari atas saran serta komentar yang konstruktif sehingga kualitas naskah ini dapat ditingkatkan.

Pernyataan Penggunaan AI dalam Penulisan

Selama penyusunan karya ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk memeriksa kepaduan kalimat yang diterjemahkan dan Grammarly untuk meninjau keakuratan tata bahasa. Setelah menggunakan alat/layanan ini, penulis meninjau dan mengedit konten sesuai kebutuhan dan bertanggung jawab penuh atas isi publikasi tersebut.

Daftar Pustaka

- Argo, B. D., & Prasetyo, J. (2020). *Dasar metode elemen hingga (1st ed.)*. UB Press.
- Arswendo, B. A., & Arifin, B. (2011). Analisa kekuatan deck pada ponton batubara Prawiramas Puri Prima II 1036 DWT dengan software berbasis metode elemen hingga. *Jurnal Kapal*, 8(1), 1–5.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2021). *Rules for hull (Vol. II, 1st ed.)*. Biro Klasifikasi Indonesia.
- DNV GL. (2015). *DNVGL-CG-0127: Class guideline – Finite element analysis*. DNV GL.
- Miliniati, G. I., & Setyawan, D. (2021). Optimasi web frame dan senta kapal sesuai peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dengan bahasa pemrograman. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 116–121.
- Rosyadi, F. A. (2021). *Analisa kekuatan deck kapal pembangkit listrik kapasitas 60 MW (Undergraduate thesis)*. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Rosyid, D., & Setyawan, D. (2000). *Kekuatan struktur kapal*. PT Pradnya Paramita.
- Utomo, E. (2018). Perbandingan desain dermaga terapung pada sistem konstruksi melintang dan memanjang: Studi kasus dermaga Pelabuhan Tideng Pale Kabupaten Tana Tidung. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 1–13.