

EFISIENSI PENGGUNAAN MATERIAL KONSTRUKSI TONGKANG MELALUI ANALISIS RESONANSI GETARAN

Debby R. Lekatompessy*

Program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Pattimura Ambon, Indonesia 97233

*E-mail korespondensi: de.lekatompessy@gmail.com

ABSTRAK

Objek penelitian ini adalah tongkang yang beroperasi di Kalimantan, dengan material muatan adalah batubara. Kekuatan struktur dan besarnya beban merupakan dua faktor penting dalam desain dan pengoperasiannya. Semakin kuat suatu struktur maka semakin aman dari segi persyaratan teknik, namun akan mengurangi beban yang berarti akan menurunkan nilai ekonomisnya. Agar efisiensi kedua faktor diatas dapat tercapai, maka perlu dilakukan rekayasa konstruksi tongkang melalui analisis resonansi getaran. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah gabungan antara penelitian survei dan pengembangan. Metode pengembangannya dilakukan dengan rekayasa pada void tank dengan menggunakan analisis resonansi getaran untuk menentukan titik kritis dan analisis kekuatan struktur pada area tersebut berdasarkan nilai kekakuan yang dihasilkan. Rekayasa dilakukan dengan penyesuaian jarak dan dimensi tiang penyangga pada void tank, serta tulangan penguat diagonalnya. Jumlah tulangan penguat diagonal berkurang 50% atau bobot berkurang 12,69 ton. Pilar bertambah berat 6,241 ton. Hasil dari rekayasa struktur ini menghasilkan peningkatan kekuatan struktur sebesar 27%, pengurangan lendutan sebesar 45,2% dan beban dapat ditingkatkan hingga 0,42% atau 6,45 ton dari beban awal yang dapat dipikul. Luaran dari penelitian ini adalah desain tongkang yang lebih ringan (biaya produksi lebih murah) sehingga daya dukungnya meningkat yang berarti menguntungkan pemilik kapal namun tetap aman dalam pengoperasiannya.

Kata kunci: *Rekayasa, barge, resonansi, void tank, penguat diagonal*

ABSTRACT

The object of this research is a barge operating in Kalimantan, with coal as the cargo material. Structural strength and load capacity are two important factors in its design and operation. The stronger the structure, the safer it is in terms of technical requirements, but it reduces the load capacity, thereby lowering its economic value. To achieve efficiency in both factors, barge construction engineering needs to be performed through structural strength analysis. The method used in this research is a combination of survey and development research. The development method involves engineering the void tank using vibration resonance analysis to determine critical points and structural strength analysis in those areas based on the resulting stiffness values. Engineering was carried out by adjusting the distance and dimensions of the support pillars in the void tank, as well as the diagonal reinforcements. The number of diagonal reinforcements was reduced by 50%, or the weight was reduced by 12.69 tons. The weight of the pillars increased 6.241 tons. The results of this structural engineering produced a 27% increase in structural strength, a 45.2% reduction in deflection, and an increase in load capacity by up to 0.42% or 6.45 tons from the initial load capacity. The outcome of this research is a lighter barge design (lower production costs), thereby increasing its load capacity, which benefits the ship owner while maintaining operational safety.

Keyword: *Engineering, barge, stiffness, void tank, diagonal reinforcements*

1. PENDAHULUAN

Tongkang merupakan alat pengangkut material di laut yang tidak menggunakan mesin penggerak dalam pengoperasiannya. Tongkang tersebut digerakkan dengan kapal tunda atau tugboat. Kapal tongkang yang beroperasi saat ini mengangkut batu bara, nikel, timah, pasir, container, kayu gelondongan, dll dalam jumlah besar. Biasanya dioperasikan di laut dan juga sungai besar. Dalam menjalankan tugasnya, tongkang harus mampu menerima beban maksimal yang dibawanya. Pemilik tentunya memiliki dua tujuan utama yaitu bagaimana tongkang dapat mengangkut sebanyak-banyaknya namun konstruksi tongkang tetap dalam batas aman saat dioperasikan. Harapan pemilik dapat terwujud dengan bantuan desainer kapal pada perusahaan pembuatan kapal. Batam, pusat pembuatan kapal di Indonesia, terkenal dengan industri pelayarannya. Pembangunannya dilakukan secara profesional sehingga banyak pesanan yang datang baik dari dalam maupun luar negeri.

Kecelakaan kapal tongkang batubara sering terjadi di wilayah operasionalnya. Tumpahan batubara dalam jumlah besar akibat kapal tongkang yang terbalik atau rusak menyebabkan pencemaran lingkungan laut. Pada tahun 2022, tercatat 7 kapal tongkang pengangkut batu bara mengalami kecelakaan di laut, dan 3 kapal tongkang sepanjang tahun 2023. Kapal tongkang kurang kuat sehingga pada kondisi cuaca buruk sangat rentan terpuntir dan patah.

Dalam perkembangannya konstruksi tongkang tidak lagi sekedar kotak di atas laut, namun fungsinya telah berkembang hingga memiliki tongkang budidaya ikan (Li et al., 2020; Wang et al., 2022), hotel terapung mini (Lin et al., 2019), yang tidak lagi berupa bangunan sederhana melainkan terlihat lebih mewah dibandingkan model konvensional. Perkembangan tersebut mengakibatkan perlunya memperhatikan konstruksi yang kuat (aman) sesuai fungsinya. Kapal tongkang pengangkut lebih fokus pada kekuatan konstruksi yang mampu menerima beban pemuatan sesuai permintaan. Pemilik sesuai tujuan komersilnya menginginkan harga beli yang cukup murah, daya dukung yang besar, dan konstruksi yang kuat. Sedangkan pemilik galangan kapal mempunyai tanggung jawab untuk mewujudkan hal tersebut dengan mematuhi peraturan yang ditentukan oleh biro klasifikasi seperti BKI. Galangan kapal harus bisa menjamin keamanan kapal tongkang yang dibangunnya.

Agar suatu tongkang mempunyai daya angkut yang besar maka harus mempunyai konstruksi yang lebih ringan, sedangkan dari segi kekuatan konstruksinya, semakin ringan bahan pembuatnya maka akan berdampak pula pada berkurangnya kekuatan struktur tersebut. Kedua hal yang bertolak belakang ini perlu dicarikan solusinya guna mengoptimalkan kedua faktor di atas. Untuk memenuhi kedua faktor diatas yaitu melalui rekayasa konstruksi tongkang dimana rekayasa dilakukan berdasarkan lokasi konstruksi kritis yang diketahui melalui analisis getaran dimana resonansi terjadi. Pengendalian getaran pasif pada struktur kapal secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori menurut lokasi di mana teknik pengendalian tersebut diterapkan: (a) pengendalian getaran pada lokasi sumber; (b) pengendalian perambatan gelombang pada struktur kapal; dan (c) pengendalian getaran di lokasi penerima Lin et al. (2009).

Tongkang yang dibangun menambahkan penguat diagonal pada area void tank dan ada juga yang tidak menggunakan penguat diagonal namun pihak galangan kapal menambah ukuran tiang penyangga dan penguat untuk menambah kekakuan pada bagian konstruksi tertentu. Penempatan penguat dan dimensi yang tepat akan mengefisienkan jumlah material konstruksi sehingga kapasitas beban dapat maksimal. Agar hal tersebut dapat terwujud, maka pada penelitian ini dilakukan rekayasa konstruksi tongkang melalui pengujian Non-Destructive Evaluation (NDE) mengingat cara tersebut terbukti sangat efisien dari segi waktu dan biaya dengan tingkat validitas yang tinggi. Penelitian dilakukan dalam 2 tahap yaitu yang pertama menganalisis titik kritis melalui uji resonansi konstruksi tongkang menggunakan perkuatan diagonal dengan daya dukung 9 ton/m². Tahap kedua dilakukan rekayasa struktur pada titik-titik kritis konstruksi. Rekayasa dilakukan terhadap dimensi dan letak tulangan diagonal serta dimensi tiang penyangga. Kekuatan

struktur sebelum dilakukan rekayasa akan dibandingkan dengan kekuatan struktur setelah dilakukan rekayasa di atas.

Berdasarkan penelitian Lin et al. (2009) dan Grice & Pinnington (2000), Gaya tersebut dapat direkayasa dengan menggeser gading dari daerah tempat terjadinya resonansi. Pilihan yang dapat digunakan untuk mengatasi resonansi tersebut adalah dengan mengubah frekuensi alami struktur yang beresonansi (Imron, 2014), yaitu dengan penambahan perkuatan untuk meningkatkan nilai kekakuan struktur pada daerah resonansi. Penelitian ini didukung (Lekatompessy et al., 2017) yang dalam penelitiannya menjelaskan letak dan bentuk sambungan, dimana pada daerah tersebut terdapat konsentrasi tegangan yang mempengaruhi kekakuan struktur (Rodrigues et al., 2019). Analisis Elemen Hingga (FEA) digunakan dalam pemodelan simulasi (Chen, 2023; Kim et al., 2023; Mauro et al., 2023). Perkembangan rekayasa dalam teknologi komputer yang berkembang secara signifikan (Hirdaris et al., 2014). Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kekuatan dengan bantuan software, diperoleh rekomendasi dimensi dan letak komponen konstruksi yang baik.

Perkembangan teknologi industri pelayaran terjadi karena adanya tuntutan masyarakat, pemilik kapal, dan pembuat kapal. Masyarakat menginginkan keamanan, kenyamanan dan harga ekonomis. Pemilik kapal menginginkan biaya produksi yang murah, keamanan struktural, dan muatan dalam jumlah besar untuk diangkut.

Para pembuat kapal menginginkan kepercayaan dari pemilik produk yang dibuatnya agar perusahaannya tetap menerima pesanan. Kapal tongkang yang dibangun akhir-akhir ini telah mengalami perubahan tatanan konstruksinya. Rekayasa dilakukan untuk mendapatkan tongkang yang mampu mengangkut muatan lebih banyak namun keamanan strukturnya terjamin dan harga lebih murah.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, analisis getaran dapat digunakan untuk menentukan titik-titik kritis (resonansi) dan kekakuan pada suatu konstruksi kapal (Lekatompessy, 2021). Nilai kekakuan, respon harmonis dan frekuensi alami pada balok membantu menganalisis kekuatan struktur secara keseluruhan (Kanwal et al., 2024) dan (Lekatompessy, 2023). Tujuan dari penelitian ini adalah: mengetahui kekuatan konstruksi tongkang dan kapasitas muat 100% untuk mengidentifikasi titik-titik kritis pada seluruh bagian konstruksi; mengetahui dimensi dan letak tulangan diagonal yang benar serta letaknya sesuai dengan kekuatan yang dianjurkan menurut biro klasifikasi yang digunakan; dan mendesain ulang struktur tongkang menjadi perhatian untuk mendapatkan struktur tongkang yang lebih kuat dimana efisiensi material dicapai dengan menambahkan tulangan diagonal pada lokasi yang tepat pada void tank. Upaya ini dapat meningkatkan jumlah muatan yang diangkut.

2. MATERIAL DAN METODE

a. Waktu dan Lokasi

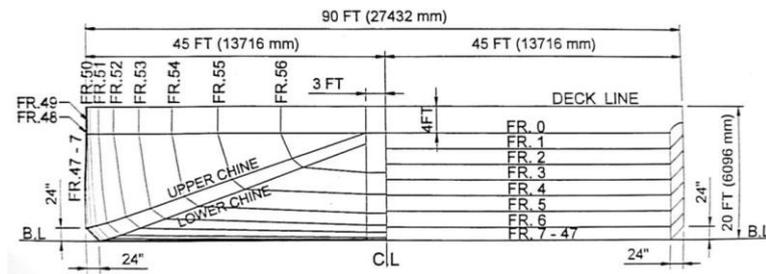
Penelitian dilaksanakan pada bulan April sampai Juli 2023. Lokasi penelitian di PT. Galangan Kapal KTU, Batam. Perhitungan dan simulasi dilakukan di Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal, Fakultas Teknik Universitas Pattimura.

b. Variabel Penelitian

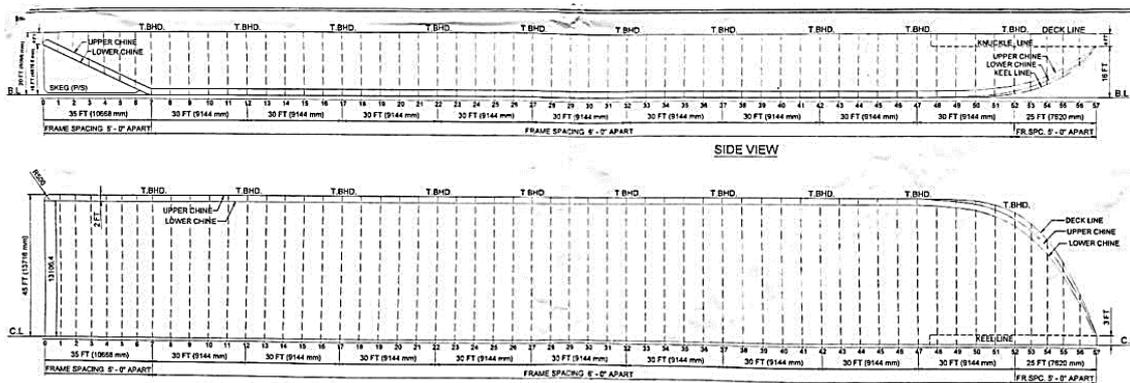
Variabel penelitian terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kekuatan tongkang sebelum rekayasa dimensi dan letak tulangan diagonal dan tiang penyangga dalam satuan MPa (Y_1) dan kekuatan tongkang setelah rekayasa dimensi tulangan diagonal dan tiang penyangga dalam satuan MPa (Y_2) dan letaknya tergantung pada dimensi yang digunakan. Variabel bebas X_1 adalah dimensi tulangan diagonal tongkang sebelum rekayasa dan X_2 adalah dimensi tiang penyangga tongkang sebelum rekayasa. Variabel bebas X_1 adalah dimensi tulangan diagonal tongkang setelah rekayasa dan X_2 adalah dimensi tiang penyangga tongkang setelah rekayasa.

c. Data

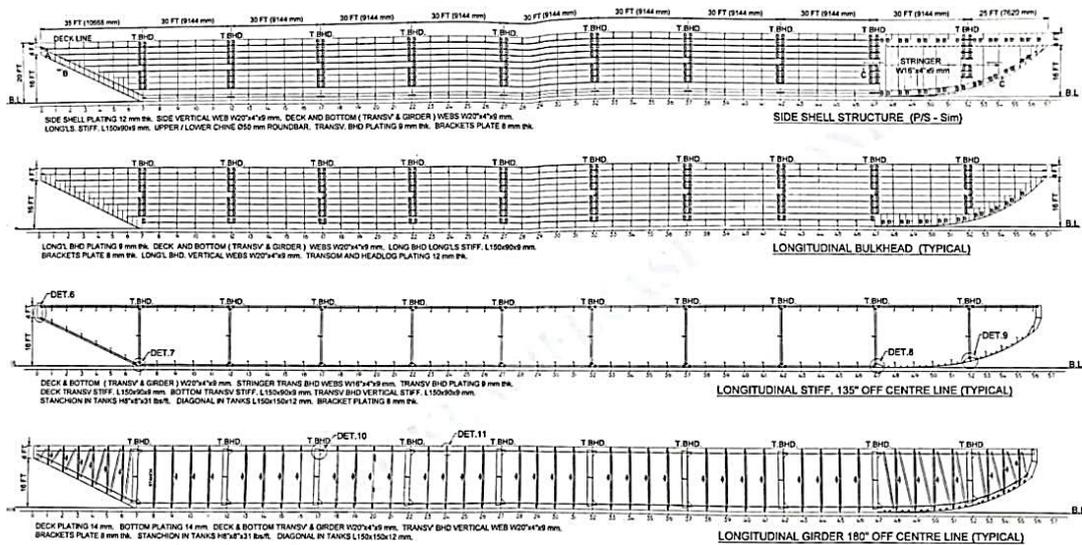
Data tongkang menggunakan perkuatan tiang atau dengan kata lain menggunakan perkuatan diagonal. Total berat muatan yang diangkut adalah 9 ton/m² dengan luas dek muatan 2.283 m².



Gambar 1. Sheer Plan



Gambar 2. Lines plan



Gambar 3. L. BHD, Centerline, Side Shell, L. Girder, L. Stiffener

d. *Metoda Analisis data*

Pada simulasi ini menggunakan metode finite elemen hingga (FEM) dengan perangkat lunak, dengan prosedur analisis secara umum sebagai berikut:

a. PRE-PROCESSING, including:

- Element type definition,
- Material properties definition,
- Modeling and meshing.

- b. SOLUTION, includes:
 - Apply boundary conditions,
 - Apply load,
 - Define the type of analysis: (1) Modal Analysis and (2) Harmonic Response Analysis,
 - Solve for results.
- c. POST-PROCESSING
 - Read the result summary (Modal and Harmonic Response Analysis),
 - Plot the calculated result of the modes of vibration,
 - Plot the displacement of each mode of vibration,
 - Plot compliance for the natural frequency,
 - Plot frequency response function.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Kekuatan konstruksi tongkang sebelum rekayasa komponen konstruksi

Pada penelitian ini proses simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak. Analisis diawali dengan proses simulasi respon harmonik yang pengaturannya sesuai dengan data awal yang tersedia. Hal ini dilakukan untuk melihat nilai amplitudo dan frekuensi tertinggi dari hasil simulasi. Hasil pengujian simulasi getaran pada arah vertikal yaitu pada arah sumbu Y, dari 4 komponen konstruksi yang ditinjau yaitu: sekat melintang dan memanjang, tiang penyangga, tulangan diagonal dan lambung tongkang dapat dilihat pada Tabel 2.

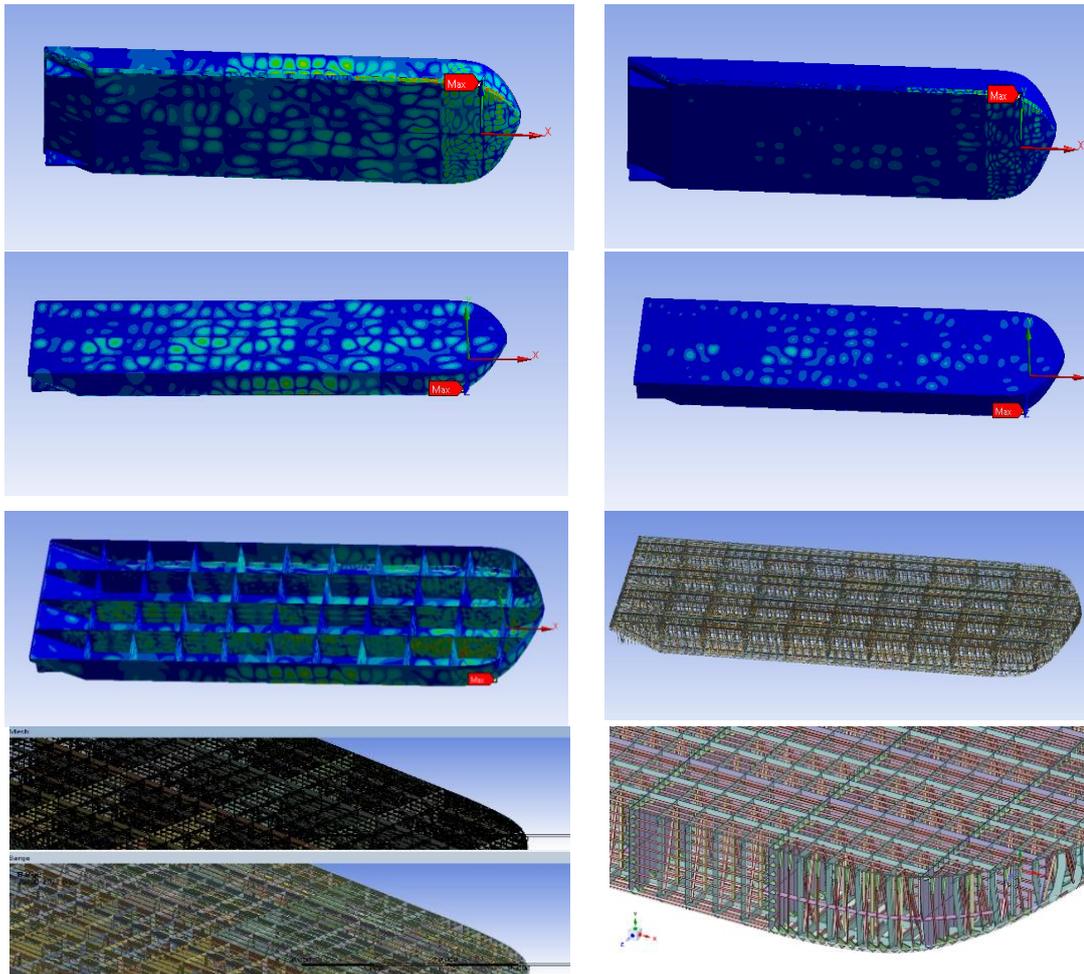
Tabel 1. Frekuensi Natural (Hz)

Mode	Frekuensi (Hz)
1	13.622
2	14.274
3	89.106
4	105.12
5	134.99
6	146.45

Untuk keperluan simulasi kekuatan struktur tongkang digunakan analisis *static structural* dengan hasil pada Tabel 2.

Tabel 2. Harmonic Response pada Transverse dan Longitudinal Bulkheads, Stanchion, Hull dan Diagonal Stiffner

No	Frequency (Hz)	Transv and Long. Bhd Y Axis		Stanchion Y Axis		Hull Y Axis		Diagonal Stiffner Y Axis	
		Amplitude (mm)	K (N/mm)	Amplitude (mm)	K (N/mm)	Amplitude (mm)	K (N/mm)	Amplitude (mm)	K (N/mm)
1	5	1,14E+00	8,81E+05	1,16E+00	8,62E+05	1,13E+00	8,81E+05	8,24E-01	1,21E+06
2	10	2,38E-01	4,21E+06	2,43E-01	4,12E+06	2,37E-01	4,21E+06	1,73E-01	5,77E+06
3	15	1,03E-01	9,76E+06	1,05E-01	9,55E+06	1,02E-01	9,76E+06	7,49E-02	1,34E+07
4	20	5,71E-02	1,75E+07	5,83E-02	1,71E+07	5,70E-02	1,75E+07	4,17E-02	2,40E+07
5	25	3,64E-02	2,75E+07	3,72E-02	2,69E+07	3,63E-02	2,75E+07	2,66E-02	3,76E+07
6	30	2,52E-02	3,97E+07	2,57E-02	3,89E+07	2,52E-02	3,97E+07	1,84E-02	5,43E+07
7	35	1,85E-02	5,41E+07	1,89E-02	5,30E+07	1,85E-02	5,42E+07	1,35E-02	7,41E+07
8	40	1,41E-02	7,08E+07	1,44E-02	6,92E+07	1,41E-02	7,08E+07	1,03E-02	9,68E+07
9	45	1,12E-02	8,96E+07	1,14E-02	8,77E+07	1,12E-02	8,97E+07	8,15E-03	1,23E+08
10	50	9,03E-03	1,11E+08	9,23E-03	1,08E+08	9,03E-03	1,11E+08	6,60E-03	1,51E+08
11	55	7,46E-03	1,34E+08	7,63E-03	1,31E+08	7,46E-03	1,34E+08	5,45E-03	1,83E+08
12	60	6,27E-03	1,60E+08	6,41E-03	1,56E+08	6,26E-03	1,60E+08	4,58E-03	2,18E+08
13	65	5,34E-03	1,87E+08	5,46E-03	1,83E+08	5,34E-03	1,87E+08	3,90E-03	2,56E+08
14	70	4,60E-03	2,17E+08	4,71E-03	2,13E+08	4,60E-03	2,17E+08	3,36E-03	2,97E+08
15	75	4,01E-03	2,49E+08	4,10E-03	2,44E+08	4,01E-03	2,50E+08	2,93E-03	3,41E+08
16	80	3,52E-03	2,84E+08	3,60E-03	2,78E+08	3,52E-03	2,84E+08	2,58E-03	3,88E+08
17	85	3,12E-03	3,20E+08	3,19E-03	3,13E+08	3,12E-03	3,21E+08	2,28E-03	4,38E+08
18	90	2,78E-03	3,59E+08	2,85E-03	3,51E+08	2,78E-03	3,59E+08	2,03E-03	4,92E+08
19	95	2,50E-03	4,00E+08	2,55E-03	3,92E+08	2,50E-03	4,01E+08	1,83E-03	5,48E+08
20	100	2,26E-03	4,43E+08	2,30E-03	4,34E+08	2,25E-03	4,44E+08	1,65E-03	6,07E+08



Gambar 4. Hasil simulasi daerah kritis sistem arah sumbu Y untuk kondisi pada daerah perkuatan diagonal, tiang penyangga, lambung kapal serta sekat memanjang dan melintang.

Tabel 3. Total deformasi dalam mm dengan variasi beban dari 1,000 kN hingga 10,000 kN

Titik	Total Deformasi (mm)									
	1,000 kN	2,000 kN	3,000 kN	4,000 kN	5,000 kN	6,000 kN	7,000 kN	8,000 kN	9,000 kN	10,000 kN
1	0.03	0.02	0.04	0.09	0.07	0.06	0.46	0.89	0.68	0.41
2	2.27	4.55	6.81	9.08	11.33	13.59	14.83	16.81	20.00	22.56
3	4.01	8.01	12.00	15.99	19.96	22.68	26.11	31.91	33.85	39.74
4	5.45	10.89	16.33	21.76	27.16	32.56	36.42	41.73	46.93	54.08
5	6.47	12.94	19.39	25.85	32.26	38.67	44.93	50.76	56.93	64.22
6	6.99	13.96	20.93	27.91	34.68	41.73	48.61	55.82	62.48	69.32
7	6.96	13.90	20.84	27.79	34.67	41.54	48.50	56.24	63.28	69.01
8	6.39	12.77	19.14	25.54	31.85	38.16	45.65	51.22	59.13	63.38
9	5.34	10.67	15.99	21.36	26.63	31.88	37.27	45.14	50.68	52.97
10	3.90	7.78	11.67	15.61	19.45	23.26	29.45	34.19	35.75	38.63
11	2.14	4.28	6.42	8.63	10.72	12.77	17.98	17.64	20.01	21.25
12	0.05	0.09	0.14	0.16	0.18	0.16	3.75	4.58	4.10	0.45
Max	7.96	15.46	22.46	29.13	36.02	43.17	50.34	57.81	65.00	71.71
Max %	0.00	94.17	45.27	29.70	23.66	19.85	16.61	14.82	12.45	10.33

Pada Tabel 3 terlihat deformasi total terjadi pada beban maksimum. Distribusi beban terbesar terdapat pada bagian tengah dengan nilai deformasi tertinggi berada pada titik 6 dan 7. Deformasi terkecil sebesar 7,96 mm dengan beban 1.000 kN dan terbesar sebesar 71.71 mm dengan beban 10.000 kN.

Pada Tabel 4 terlihat deformasi terarah terjadi pada beban maksimum. Distribusi beban terbesar terdapat pada bagian tengah dengan nilai deformasi tertinggi pada arah sumbu Y berada

antara titik 6 dan 7. Deformasi terkecil sebesar 0,18 mm pada beban 1.000 kN dan terbesar adalah 1,70 mm pada beban 10.000 kN.

Tabel 4. Deformasi directional dalam mm dengan variasi beban dari 1,000 kN hingga 10,000 kN

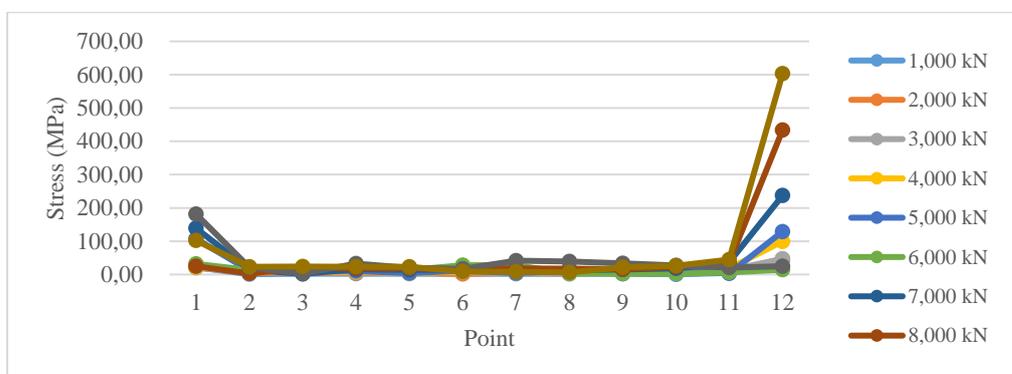
Titik	Deformasi (mm)									
	1,000 kN	2,000 kN	3,000 kN	4,000 kN	5,000 kN	6,000 kN	7,000 kN	8,000 kN	9,000 kN	10,000 kN
1	0.02	0.03	0.03	0.04	0.07	0.08	0.19	0.22	0.09	0.12
2	2.27	4.54	6.81	9.07	11.32	13.58	13.66	18.19	17.43	22.54
3	4.01	8.00	11.99	15.98	19.96	23.92	25.49	29.07	35.94	39.74
4	5.45	10.89	16.33	21.76	27.16	32.56	37.81	43.57	46.70	54.08
5	6.47	12.94	19.39	25.85	32.26	38.67	44.98	51.68	58.05	64.22
6	6.99	13.96	20.92	27.90	34.82	41.72	48.67	55.55	62.48	69.30
7	6.95	13.89	20.82	27.77	34.65	41.51	48.38	56.21	62.62	68.95
8	6.38	12.74	19.10	25.49	31.80	38.09	45.69	52.53	57.58	63.26
9	5.32	10.63	15.94	21.29	26.54	31.77	38.96	42.82	48.23	52.78
10	3.87	7.73	11.59	16.79	19.31	23.09	29.43	31.64	35.38	38.34
11	2.10	4.20	6.30	8.48	10.53	12.53	14.61	17.35	19.71	20.85
12	0.02	0.11	0.11	0.10	0.08	0.12	0.16	0.11	0.17	0.43
Max	0.18	0.36	0.53	0.74	0.85	1.04	1.20	1.71	1.98	1.70
Max %	0.00	98.22	48.14	39.89	14.68	21.84	15.66	42.54	15.59	13.84

Tabel 5. Tegangan dalam MPa dengan variasi beban of 1,000 kN hingga 10,000 kN

Titik	Tegangan (MPa)									
	1,000 kN	2,000 kN	3,000 kN	4,000 kN	5,000 kN	6,000 kN	7,000 kN	8,000 kN	9,000 kN	10,000 kN
1	21.96	21.98	20.35	22.19	106.67	32.00	138.87	24.93	181.26	102.65
2	0.63	4.79	6.98	9.49	11.79	13.98	14.47	2.91	21.21	23.21
3	2.30	4.57	6.75	9.98	11.86	16.24	1.68	19.79	2.56	24.07
4	2.27	4.39	6.68	8.60	10.73	21.83	15.82	18.56	32.84	23.17
5	2.34	4.71	7.01	3.06	3.71	13.89	13.56	18.37	20.31	23.23
6	2.44	1.72	7.30	9.68	12.07	27.81	15.01	15.75	16.65	8.50
7	2.39	4.75	2.57	9.50	4.26	27.87	16.41	18.60	41.29	8.35
8	2.20	4.36	1.97	8.65	10.88	2.83	13.06	17.61	39.55	6.43
9	2.16	4.38	6.74	8.07	2.30	2.23	15.12	16.33	33.31	21.98
10	0.31	5.68	7.58	11.34	13.38	2.12	18.12	23.41	27.00	26.07
11	4.89	9.35	13.84	18.48	3.57	6.50	36.84	35.77	21.14	44.86
12	42.96	46.63	47.06	99.40	128.99	14.41	237.32	433.87	24.90	603.33
Max	137.72	325.30	413.36	651.03	813.54	976.22	1,139.20	1,306.00	1,470.10	1,380.40
Max %	0.00	136.20	27.07	57.50	24.96	20.00	16.70	14.64	12.57	6.10

Pada Tabel 5 terlihat tegangan maksimum terjadi pada beban maksimum. Distribusi beban terbesar terdapat pada haluan dan buritan kapal tongkang dengan nilai tegangan tertinggi pada bagian ujung. Tegangan terkecil sebesar 137,72 MPa dengan beban 1.000 kN dan terbesar sebesar 1.380 MPa dengan beban 10.000 kN.

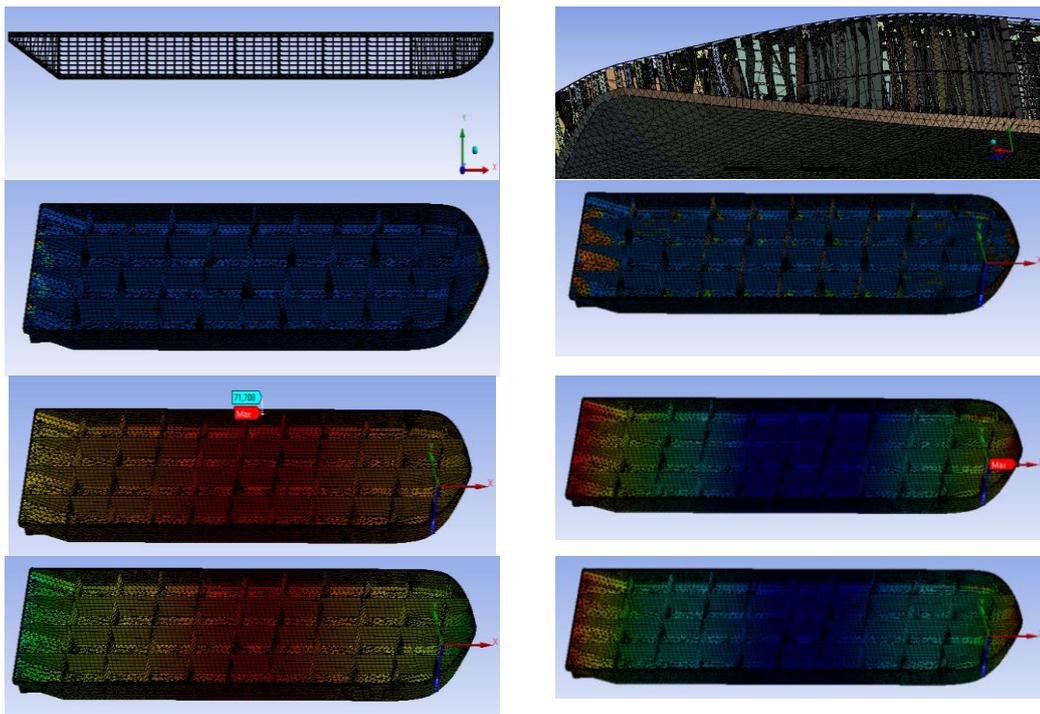
Gambar 5 menunjukkan tegangan yang terjadi pada bagian haluan dan buritan kapal tongkang dengan besarnya tergantung pada muatan yang diangkut.



Gambar 5. Grafik tegangan kerja dengan beban dari 1,000 kN hingga 10,000 kN

Berdasarkan hasil simulasi terlihat bagian tersebut mengalami deformasi (mm) dan tegangan (MPa). Deformasi total yang terjadi menunjukkan bagian tengah mempunyai nilai defleksi yang tinggi ditandai dengan warna merah. Semakin banyak area merah maka semakin tinggi nilai deformasi yang terjadi.

Pada gambar terlihat bahwa semakin besar beban maka luas kritis semakin besar. Sedangkan untuk deformasi searah sumbu Y terjadi kondisi sebaliknya, dimana akibat kurangnya kekakuan struktur pada haluan dan buritan, maka ketiga beban besar tersebut diterapkan pada bagian tengah tongkang sehingga menimbulkan tegangan yang besar pada haluan dan buritan.



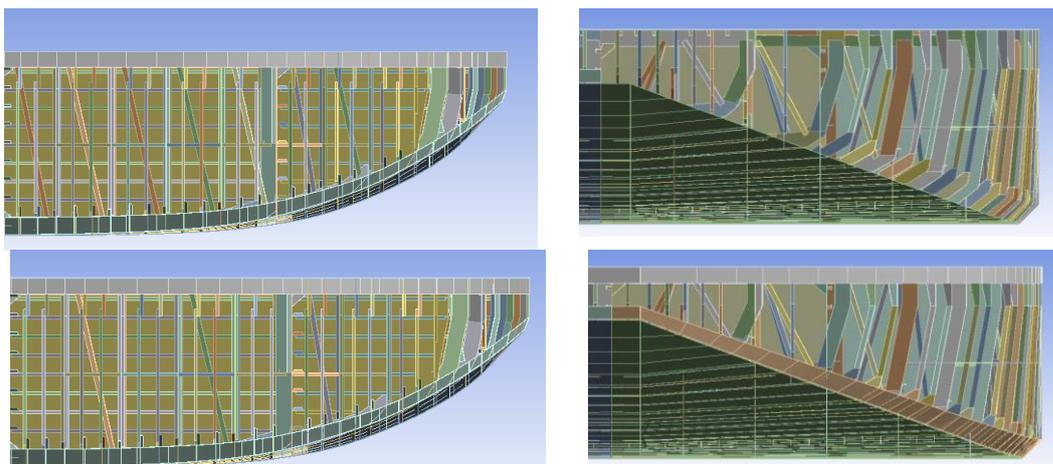
Gambar 6. Simulasi deformasi total, deformasi directional, dan tegangan kerja dengan beban 1.000 kN hingga 10.000 kN

Berdasarkan data yang ada, beban maksimal yang mampu diangkat kurang lebih 10.000 kN atau 1.019,72 ton. Berat total struktur adalah 1.547 ton, yang meliputi berat tiang penyangga 62.416 ton dan tulangan diagonal 25.381 ton.

b. Kekuatan Konstruksi Tongkang Setelah Rekayasa Komponen Void Tank

Rekayasa dilakukan pada dimensi tiang penyangga profil H dengan ketebalan dari 9 mm menjadi 11 mm. Jumlah penguat diagonal dikurangi 50% atau bobot berkurang sebesar 12,69 ton. Total jumlah tangki 44 void tank yang berisi 16 tiang penyangga per tangki, 8 tangki di haluan dan 4 di buritan dengan isi 24 tiang penyangga untuk setiap void tank. Berat tiang penyangga bertambah 6,241 ton.

Perubahan tersebut berdampak pada kekuatan struktur dimana terjadi peningkatan kekuatan seiring dengan peningkatan luas penampang meskipun jumlah tulangan penguat diagonal dikurangi sebesar 50%. Berdasarkan hasil analisis static structural, kekuatan struktur setelah rekayasa meningkat. Hal ini ditandai dengan berkurangnya nilai tegangan kerja yang bekerja pada beban maksimum dari 1.380,4 MPa menjadi 1.006,54 MPa. Deformasi direction berkurang dari 1,7 mm menjadi 0,93 mm pada beban maksimum di bagian kritis. Semua ini mengakibatkan muatan bertambah sebanyak 6,45 ton.



Gambar 7. Simulasi penambahan dimensi tiang penyangga dan pengurangan jumlah diagonal struktur tongkang

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis getaran, dilakukan rekayasa pada titik-titik kritis dengan cara memperbesar ukuran tiang penyangga dan mengurangi jumlah tulangan penguat diagonal. Hasil dari rekayasa struktur ini menghasilkan peningkatan kekuatan struktur sebesar 27%, pengurangan lendutan atau deformasi sebesar 45,2% dan muatan dapat ditingkatkan hingga 0,42% atau bertambah 6,45 ton dari muatan awal.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, H. (2023). Simulation research on ship electric propulsion speed regulation system based on variable structure control and FPGA. *Optik*, 272, 170265. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170265>
- Grice, R. M., & Pinnington, R. J. (2000). A METHOD FOR THE VIBRATION ANALYSIS OF BUILT-UP STRUCTURES, PART I: INTRODUCTION AND ANALYTICAL ANALYSIS OF THE PLATE-STIFFENED BEAM. *Journal of Sound and Vibration*, 230(4), 825–849. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2657>
- Hirdaris, S. E., Bai, W., Dessi, D., Ergin, A., Gu, X., Hermundstad, O. A., Huijsmans, R., Iijima, K., Nielsen, U. D., Parunov, J., Fonseca, N., Papanikolaou, A., Argyriadis, K., & Incecik, A. (2014). Loads for use in the design of ships and offshore structures. *Ocean Engineering*, 78, 131–174. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.09.012>
- Imron, A. (2014). Kerusakan struktur akibat getaran lokal pada kapal yang jarang diperhatikan; Analisis dan solusi (Studi kasus). *Jurnal Kelautan Nasional*, 9(1), 11–19. <https://doi.org/10.15578/jkn.v9i1.6198>
- Kanwal, G., Ahmed, N., & Nawaz, R. (2024). A comparative analysis of the vibrational behavior of various beam models with different foundation designs. *Heliyon*, 10(5), e26491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26491>
- Kim, I.-T., Kim, S., Paik, K.-J., Yang, J.-K., & Kwon, S.-Y. (2023). Free-running CFD simulations to assess a ship-manoeuvring control method with motion forecast in waves. *Ocean Engineering*, 271, 113806. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113806>
- Lekatompessy, D. R. (2021). The effect analysis of the stiffness changes of a Traditional Fishing Boat Foundation on Vibration Amplitude. *TEKNIK*, 42(1), 71–78. <https://doi.org/10.14710/TEKNIK.V42I1.30978>
- Lekatompessy, D. R. (2023). Local vibration reduction of machine support systems through transmissibility pattern analysis in resonant construction. *AIP Conference Proceedings*, 2588(1), 040012. <https://doi.org/10.1063/5.0111908>

- Lekatompessy, D. R., Ariana, I. M., Zubaydi, A., & Erwandi, E. (2017). The Vibration Characteristics of Gofasa Wood (*vitex cofassus*). *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 11(9), 644–650. <https://doi.org/10.15866/IREME.V11I9.11636>
- Li, L., Brusset, M., Ong, M. C., & Wu, X. (2020). Numerical Analysis of a Floating Fish Cage With Feeding Systems. *Volume 5: Ocean Space Utilization*, V005T05A001. <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18112>
- Lin, T. R., Pan, J., O’Shea, P. J., & Mechefske, C. K. (2009). A study of vibration and vibration control of ship structures. *Marine Structures*, 22(4), 730–743. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2009.06.004>
- Lin, Y.-H., Chih Lin, Y., & Tan, H.-S. (2019). Design and functions of floating architecture – a review. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(7), 880–889. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1503761>
- Mauro, F., Vassalos, D., Paterson, D., & Boulougouris, E. (2023). Evolution of ship damage stability assessment—Transitioning designers to direct numerical simulations. *Ocean Engineering*, 268, 113387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113387>
- Rodrigues, L. A. S., Loayza L, C. R., Borges, D. J. A., Baia, P. E. C., Freitas, E. N., & Braga, E. M. (2019). Welding procedures influence analysis on the residual stress distribution and distortion of stiffened panels welded via robotized FCAW. *Thin-Walled Structures*, 141, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.055>
- Wang, G., Martin, T., Huang, L., & Bihs, H. (2022). Numerical investigation of the hydrodynamics of a submersible steel-frame offshore fish farm in regular waves using CFD. *Ocean Engineering*, 256, 111528. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111528>