

Modifikasi *Main Deck Barge* 320 ft Menggunakan Sandwich Plate System Untuk Mengurangi Stiffener

Dina Indriana Putri, Naufal Abdurrahman Prasetyo¹, dan Meschac Timothee Silalahi²

Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

E-mail: dinaindrianaputri@gmail.com

Abstrak

Kapal tongkang pada umumnya menggunakan pelat baja konvensional. Sandwich Plate System (SPS) menawarkan alternatif konstruksi yang lebih ringan dengan tetap mempertahankan kemampuan struktural dalam menahan beban. Penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan SPS pada geladak utama tongkang 320 kaki, menentukan pengurangan jumlah stiffener berdasarkan batas tegangan izin, serta mengevaluasi deformasi dan pengaruhnya terhadap berat konstruksi. Metode penelitian menggunakan pemodelan numerik berbasis Finite Element Method (FEM) dengan pembebanan muatan tidak merata. Analisis dilakukan terhadap lima model, yaitu geladak konvensional dan empat variasi SPS dengan jumlah stiffener berbeda. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan Von Mises, deformasi maksimum, dan berat konstruksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh model SPS menghasilkan tegangan di bawah batas izin 175 MPa, masing-masing sebesar 79,42 MPa, 79,34 MPa, 80,52 MPa, dan 84,96 MPa, sedangkan geladak konvensional sebesar 160,69 MPa. Deformasi SPS berkisar 0,72–0,81 mm, lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 2,21 mm. Pengurangan stiffener dan penerapan SPS menghasilkan pengurangan berat hingga 56,55 ton atau 69,97% pada SPS 4. Berdasarkan keseimbangan respons struktural dan efisiensi berat, SPS 2 dengan 22 stiffener dipilih sebagai konfigurasi paling optimal, dengan tegangan 79,34 MPa, deformasi 0,72 mm, dan pengurangan berat 25,33 ton atau 31,34%. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan SPS berpotensi mengurangi berat konstruksi dan meningkatkan kapasitas payload kapal tongkang.

Kata kunci : Metode Elemen Hingga, *Sandwich Plate System*, Pengurangan Beban.

Abstract

Barges generally use conventional steel plates for deck construction. The Sandwich Plate System (SPS) offers a lighter structural alternative while maintaining structural load-bearing capacity. This study aims to analyze the application of SPS to the main deck of a 320-foot barge, determine the reduction in the number of stiffeners based on the allowable stress limit, and evaluate deformation and its effect on structural weight. The study uses numerical modeling based on the Finite Element Method (FEM) with non-uniform cargo loading. Five models were analyzed, consisting of a conventional deck and four SPS configurations with different numbers of stiffeners. The evaluated parameters include Von Mises stress, maximum deformation, and structural weight. The simulation results show that all SPS models produce stresses below the allowable limit of 175 MPa, with values of 79.42 MPa, 79.34 MPa, 80.52 MPa, and 84.96 MPa, respectively, while the conventional deck produces 160.69 MPa. SPS deformation ranges from 0.72–0.81 mm, lower than the conventional deck at 2.21 mm. The reduction in stiffeners combined with the application of SPS results in a maximum weight reduction of 56.55 tons or 69.97% for SPS 4. Based on the balance between structural response and weight efficiency, SPS 2 with 22 stiffeners is selected as the most optimal configuration, with a stress of 79.34 MPa, deformation of 0.72 mm, and weight reduction of 25.33 tons or 31.34%. These results indicate that the application of SPS has the potential to reduce structural weight and increase the payload capacity of the barge.

Keywords : *Finite Element Method, Sandwich Plate System, Weight Reduction.*

1 Pendahuluan

Kapal tongkang merupakan jenis kapal pengangkut muatan curah kering dalam jumlah besar seperti batu bara, pasir, ataupun material berat lainnya. Sebagai pilar penting dalam pengangkutan material, ketersediaan ruang muat dan kapasitas angkut (*payload*) menjadi faktor krusial yang menentukan efisiensi operasional tongkang [1]. Salah satu tantangan terbesar dalam desain kapal tongkang adalah optimalisasi berat konstruksi tanpa mengurangi integritas struktural yang diperlukan untuk menahan beban muatan tinggi sehingga tidak membatasi jumlah *payload* yang dapat diangkut. Penggunaan pelat baja konvensional sebagai panel pada *main deck* sering kali menambah beban dari berat kapal kosong (*lightweight tonnage*) kapal, yang pada akhirnya membatasi kapasitas *payload* yang dapat dimuat. Guna mengatasi keterbatasan tersebut, penerapan Sandwich Plate System (SPS), yang terdiri dari dua lapisan pelat baja (*face plate*) yang dipisahkan oleh material inti (*core*), dapat diintegrasikan sebagai alternatif material struktur yang lebih ringan. Teknologi ini menawarkan peningkatan rasio kekuatan terhadap berat serta memungkinkan pengurangan ketergantungan terhadap *stiffener* konvensional [2].

Penerapan SPS pada kapal tongkang telah terbukti efektif dalam mereduksi *lightweight tonnage* sekaligus meningkatkan kapasitas muatan kapal secara keseluruhan sebagai konsekuensi langsung dari pengurangan berat struktur yang signifikan [3]. Pengurangan berat struktural yang dihasilkan bahkan dapat mencapai kisaran 23,13% hingga 32,83% dibandingkan dengan desain struktur geladak baja konvensional, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan kapasitas *payload* kapal [4]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konstruksi geladak baja konvensional masih memiliki peluang untuk dioptimalkan dalam segi berat. Sehingga penerapan SPS diperlukan untuk mengurangi berat struktur sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap elemen penegar seperti pilar dan *stiffener* [5]. Oleh karena itu, analisis pengurangan *stiffener* hingga konfigurasi tanpa *stiffener* dianalisis untuk mengetahui sejauh mana struktur SPS mampu menahan tegangan dan tetap memenuhi batas tegangan yang diizinkan.

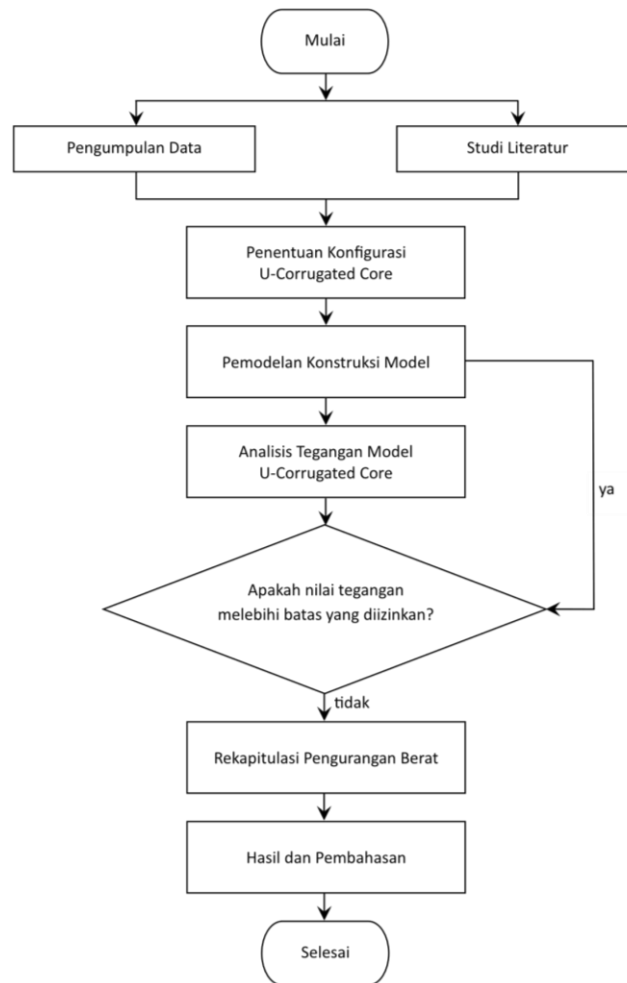
Di sisi lain, validasi numerik melalui simulasi elemen hingga menjadi krusial untuk menjamin bahwa respons struktur terhadap beban operasional tetap memenuhi kriteria teknis *class*. Pada penelitian ini, simulasi numerik dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan muatan yang tidak merata (*non-uniform cargo loading*) untuk merepresentasikan distribusi beban aktual pada geladak kapal tongkang. Sejalan dengan hal tersebut, penggunaan *Corrugated Core* sebagai struktur SPS menawarkan potensi peningkatan efisiensi struktural melalui rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, distribusi tegangan yang lebih merata, serta transfer beban yang efektif [6]. Namun penerapan konfigurasi tersebut pada geladak kapal tongkang dengan variasi jumlah *stiffener* hingga tanpa *stiffener* masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi respons struktur berdasarkan tegangan dan deformasi, dengan batas tegangan yang mengacu pada standar Lloyd's Register, serta melakukan rekapitulasi pengurangan berat struktur dan potensi peningkatan *payload* pada kapal tongkang 320 kaki.

Rumusan masalah pada penelitian ini meliputi bagaimana pengaruh penerapan variasi SPS terhadap respons struktur *main deck* tongkang 320 kaki dibandingkan dengan konstruksi baja konvensional terhadap variabel tegangan dan deformasi. Selanjutnya seberapa besar potensi pengurangan berat konstruksi yang dapat dicapai melalui penerapan SPS sehingga dapat meningkatkan kapasitas *payload*. Sesuai dengan rumusan masalah yang telah disampaikan serta urgensinya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan SPS pada geladak kapal tongkang berukuran 320 kaki dengan mengevaluasi pengaruh variasi pengurangan *stiffener* terhadap respons struktur, meliputi tegangan, deformasi, pengurangan berat konstruksi, serta potensi peningkatan kapasitas *payload* dibandingkan dengan konstruksi baja konvensional.

Penelitian ini dibatasi pada analisis struktur *main deck* pada kapal tongkang 320 kaki dengan fokus pada perbandingan antara panel baja konvensional dan variasi SPS. Beban yang ditinjau adalah beban statis akibat muatan tidak merata, tanpa membahas beban dinamis, *impact loading*, *bending global*, *buckling* dan fenomena lainnya. Standar regulasi yang dirujuk terbatas pada aturan *class* untuk menentukan dimensi material serta standar untuk kriteria penerimaan kekuatan struktur. Konfigurasi *U-Corrugated Core* dalam penelitian ini mengacu pada model panel sandwich yang diterapkan pada geladak tugboat dalam penelitian sebelumnya [7]. Penelitian tersebut mengacu pada konsep *U-Beam Corrugated* yang dikembangkan dalam penelitian terdahulu, kemudian menerapkannya pada geladak kapal tugboat.

2 Metodologi Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif yaitu metode pemodelan numerik atau *finite element analysis*. Berdasarkan diagram alir pada gambar 1, tahapan penelitian secara garis besar dibagi menjadi lima fase utama, yang meliputi:

1. Inisiasi, melalui pengumpulan data *drawing construction* tongkang dan studi literatur mengenai konfigurasi *U-Corrugated Core* yang mengacu pada penelitian sebelumnya [7].
2. Pemodelan, meliputi model konvensional dan variasi SPS pada geladak kapal tongkang 320 kaki, dengan variasi jumlah *stiffener* hingga konfigurasi tanpa *stiffener*.
3. Simulasi dan validasi numerik berbasis finite element method (FEM) untuk menguji batas tegangan struktur dan nilai deformasi.
4. Rekapitulasi terhadap reduksi berat struktur geladak
5. Hasil dan pembahasan akhir.

Analisis ini dilakukan dengan membandingkan tegangan Von Mises antara model geladak konvensional dengan model geladak SPS. Perbandingan ini mencakup desain geladak dengan variasi jumlah *stiffener*. Tujuan perbandingan ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan penerapan SPS pada struktur geladak tongkang menggunakan metode *finite element analysis* (FEA).

2.2 Pengumpulan Data

2.2.1 Dimensi Utama Kapal Tongkang

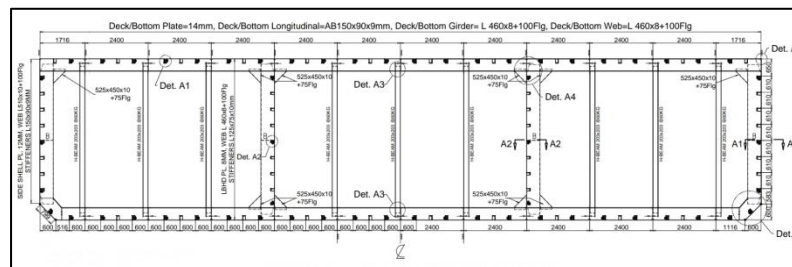
Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari instansi tempat penulis melaksanakan praktik magang, yaitu berupa dokumen teknis dari proyek pembangunan kapal tongkang berukuran $320 \times 90 \times 20$ kaki. Dokumen tersebut mencakup gambar General Arrangement yang digunakan sebagai acuan dimensi dan tata letak umum kapal, serta *frame spacing*. Kemudian gambar Mid Construction yang memberikan informasi detail mengenai konfigurasi struktural penampang tengah kapal sebagai dasar dalam proses pemodelan dan analisis.

Data ukuran utama kapal digunakan sebagai dasar dalam pemodelan struktur dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini. Parameter seperti panjang, lebar, tinggi, serta karakteristik utama lainnya menjadi acuan dalam penyusunan model sehingga sesuai dengan kondisi kapal yang diteliti. Adapun data ukuran utama kapal disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Data ukuran utama kapal tongkang

Principal Particular	
Length O.A.	320 Ft (97.60m)
Beam MLD	90 Ft (27.43m)
Depth	20 Ft (6.10m)
Frame Spacing	
Fr.0-Fr.50	1800mm
Fr.50-Fr.62	600mm

Berikut adalah gambar kerja yang mendefinisikan batasan ketebalan pelat serta dimensi pada struktur tongkang yang kemudian akan di ekstraksi ke dalam model 3D elemen hingga guna menganalisis karakteristik distribusi tegangan akibat beban operasional diatas geladak utama.

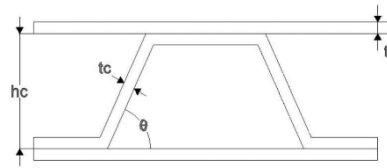


Gambar 2. Typical Transweb Section

2.2.2 Panel Sandwich

Panel sandwich merupakan struktur berlapis yang terdiri atas dua lapisan *faceplate* dan *core* diantaranya, dengan *core* berfungsi mempertahankan jarak antar lapisan sekaligus meningkatkan efisiensi struktural. Salah satu pengembangannya adalah *Corrugated Core*, yaitu inti bergelombang yang dirancang untuk meningkatkan kekakuan dengan penambahan massa yang relatif rendah hingga 30-50% dibandingkan pelat baja konvensional. Struktur ini juga memiliki ketahanan terhadap beban yang lebih baik melalui distribusi tegangan yang lebih merata, serta mampu mentransfer beban secara efektif dengan kebutuhan elemen pendukung tambahan yang lebih sedikit. Berbeda dengan SPS berbasis elastomer yang menggunakan material polimer sebagai inti, *Corrugated Core* pada *metallic sandwich panel* tersusun dari material logam yang dihubungkan dengan *faceplate* melalui sambungan pengelasan. Dengan karakteristik tersebut, *metallic Corrugated Core* tidak hanya berfungsi sebagai pengisi di antara *faceplate*, tetapi juga menjadi bagian dari sistem struktural panel yang berkontribusi terhadap kekakuan dan kemampuan

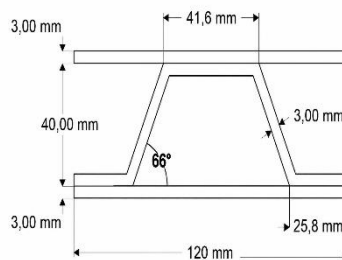
panel dalam menahan beban yang lebih kuat dari polimer [8].



Gambar 3. Penamaan dimensi tf (tebal *faceplate*), tc (tebal *core*), dan hc (tinggi *core*) pada panel *U-Corrugated Core sandwich plate* [7]

Salah satu bentuk *metallic Corrugated Core* yang dapat diterapkan pada struktur kapal adalah *U-Corrugated Core*, yang terdiri atas dua *faceplate* dengan inti berbentuk U diantaranya. Konfigurasi ini memiliki parameter geometris yang meliputi tinggi *core*, sudut kemiringan, serta ketebalan *faceplate* dan *core*. Dalam penerapannya pada struktur kapal, konfigurasi ini dapat dikembangkan sebagai alternatif terhadap konstruksi geladak konvensional dengan mempertimbangkan respons tegangan, deformasi, dan berat struktur.

Konfigurasi *U-Corrugated Core* telah dikaji oleh Haq [7] melalui analisis numerik pada struktur geladak kapal tugboat. Penelitian tersebut menggunakan *core* dengan tinggi 40 mm dan mengevaluasi pengaruh variasi geometri serta ketebalan *faceplate* dan *core* terhadap respons struktur. Salah satu konfigurasi, yaitu model dengan sudut *core* 66° dan ketebalan *faceplate* (tf) serta *core* (tc) masing-masing 3 mm, menghasilkan tegangan sebesar 83,365 MPa dan deformasi sebesar 0,584 mm. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan dengan model geladak konvensional yang menghasilkan tegangan sebesar 174,89 MPa dan deformasi sebesar 5,313 mm. Selain memberikan respons

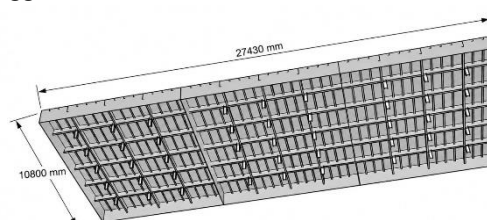


Gambar 4. Dimensi model-1 sudut *core* 66° ketebalan tf - tc yaitu 3-3 [7]

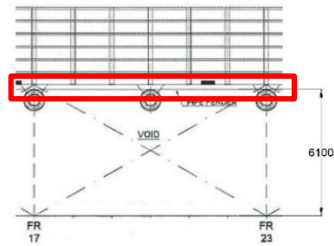
Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi $tf = 3$ mm dan $tc = 3$ mm memberikan keseimbangan antara kinerja struktural dan efisiensi berat dibandingkan geladak konvensional. Oleh karena itu, konfigurasi tersebut digunakan sebagai dasar geometri SPS dalam penelitian ini, sedangkan pengaruh jumlah *stiffener* selanjutnya dikaji melalui beberapa variasi konfigurasi pada geladak kapal tongkang 320 kaki.

2. 3 Pemodelan Konstruksi

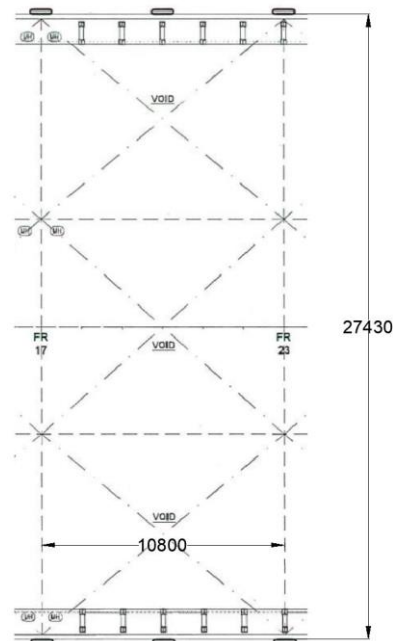
Data drawing Mid Construction Plan digunakan sebagai acuan utama pembuatan model konstruksi yang akan digunakan sebagai analisis sebab gambar ini memberikan informasi detail mengenai susunan pelat, penegar, serta struktur lainnya. Model analisis penelitian menggunakan struktur geladak tongkang bagian tengah karena umumnya area tersebut mengalami distribusi beban paling signifikan, berdasarkan panduan Lloyd's Register GN 032 [9]. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan model yang membentang dari *frame* 17 hingga *frame* 25. Analisis menggunakan metode elemen hingga.



Gambar 5. Dimensi model



Gambar 6. Tampak samping model untuk analisis



Gambar 7. Tampak atas model untuk analisis

Model akan dibuat kedalam beberapa variasi yang merepresentasikan tongkang dengan geladak konvensional, model dengan geladak SPS dengan jumlah *stiffener* normal, model geladak SPS dengan jarak *stiffener* 800 mm, model SPS dengan jarak *stiffener* 1200 mm, terakhir model SPS namun tidak menggunakan *stiffener* dan hanya terdapat *girder*.

2. 4 Perhitungan beban geladak

Kapal tongkang ini mengangkut muatan berupa batu bara di permukaan geladak dengan bagian tengah yang menerima beban paling besar. Untuk itu perlu diketahui beban yang diterima tongkang dengan cara melakukan perhitungan pembebanan total terlebih dahulu. Estimasi sebaran tongkang hanya pada bagian yang dibatasi oleh sideboard yang membatasi muatan batu bara bituminous yang memiliki massa jenis sebesar 1600 kg/m³.

Volume Sideboard:
 $= 83700 \times 26820 \times 3657$
 $= 8.210.021.502 \text{ mm}^3$ atau $8.210,021 \text{ m}^3$.

Perhitungan Berat:
 $= \text{volume} \times \text{density}$
 $= 8.210,021 \text{ m}^3 \times 1600 \text{ kg/m}^3$
 $= 13.136.033,6 \text{ kg}$ atau sama dengan $13.136,033 \text{ ton}$
 $= 13.136.033 \text{ kg} + (13.136.033 \text{ kg} \times 10\%)$
 $= 14.449.636 \text{ kg}$

Selanjutnya, Beban yang bekerja pada geladak dihitung berdasarkan berat muatan menggunakan Persamaan ($F = m \times g$), dengan (m) merupakan massa muatan dan (g) adalah percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh gaya sebesar $141.750.929 \text{ N}$ untuk keseluruhan dek. Maka dari itu, jika berat total tersebut dibagi pula dengan luas total yaitu $2.244.834 \text{ m}^2$, maka didapatkan gaya per luas nya adalah $63.145,4 \text{ N/m}^2$ atau sekitar 6 ton/m^2 . Sehingga beban keseluruhan yang akan diberikan pada model dengan luas geladak yang menerima beban sebesar $289,656 \text{ m}^2$ adalah $18.291.870,18 \text{ N}$.

Untuk menyamai kondisi aktual yang dimana pada bagian tengah menerima beban lebih banyak dari pada bagian pinggir, maka pembebanan dianggap menggunakan rasio beban tengah tiga kali dari pada beban pinggir. Sehingga didapatkan hasil tegangan yaitu $3.658.374 \text{ N}$ pada kedua bagian pinggir, dan $10.975.122 \text{ N}$ untuk ditengah.

Kemudian untuk nilai tegangan izin berdasarkan ketentuan LR Part 3, Ch 4, Section 5.6.1, adalah 175 Mpa .

2. 5 Evaluasi hasil dan pengurangan berat konstruksi

Hasil simulasi akan dievaluasi berdasarkan dua kriteria, yaitu tegangan maksimum dan nilai deformasi. Selain itu, selisih berat antara konstruksi SPS dan baja konvensional juga dihitung untuk mengetahui potensi peningkatan kapasitas muat kapal. Terakhir adalah pembahasan model yang dianggap paling optimal.

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Setup simulai FEM

Untuk memperoleh hasil yang representatif, dilakukan penyesuaian parameter simulasi pada lima variasi desain secara sistematis menggunakan software elemen hingga. Setup ini terdiri dari beberapa komponen penting, antara lain material, koneksi antar komponen, batasan geometri, pengaturan mesh, dan terakhir adalah pembebanan. Berikut adalah uraian lengkapnya:

1. Material

Material yang digunakan dalam pemodelan ini adalah ASTM A36, dengan karakteristik mekanis seperti yang ditampilkan pada tabel 2 berikut.

Table 2. Material properties ASTM A36 dan core SPS

Material Properties	Value (units)
Density (ρ)	7.85 ton/m^3
Young's Modulus (E)	200 GPa
Poisson's Ratio (ν)	0.30
Yield Stress (σ_y)	250 MPa

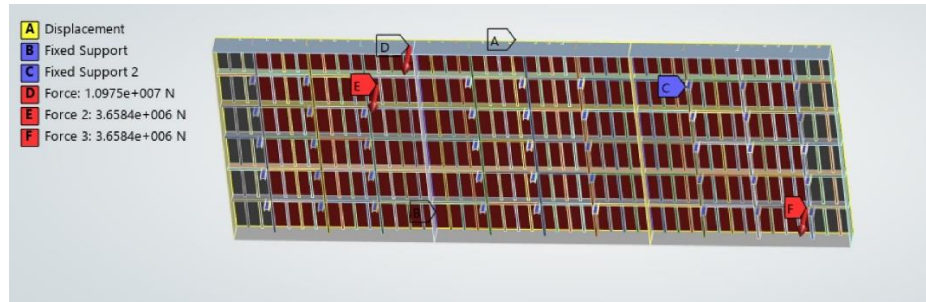
2. Koneksi antar komponen

Pada proses analisis, seluruh elemen struktur yang terdiri atas pelat, *stiffener*, *web*, *girder*, *side shell*, serta *bulkhead*, dikoneksikan menggunakan jenis *share Topology*. Pengaturan ini mengasumsikan bahwa bagian-bagian struktur yang saling terhubung memiliki node dan mesh yang kontinu pada antarmuka, sehingga perpindahan dan gaya dapat ditransfer secara langsung antar komponen tanpa adanya celah atau kontak terpisah.

3. Batasan geometri

Sebelum proses analisis dilakukan, kondisi batas (boundary condition) pada model pondasi ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi pengekangan struktur yang mendekati keadaan aktual. Kondisi batas yang digunakan berupa displacement dengan perpindahan x,y, dan z menjadi 0 pada tiap sisi geladak. Selanjutnya tumpuan jepit (fixed geometry) *stanchion* dan *longitudinal bulkhead*. Penerapan kondisi batas tersebut mengasumsikan bahwa area yang mengalami pengekangan tidak mengalami perpindahan maupun

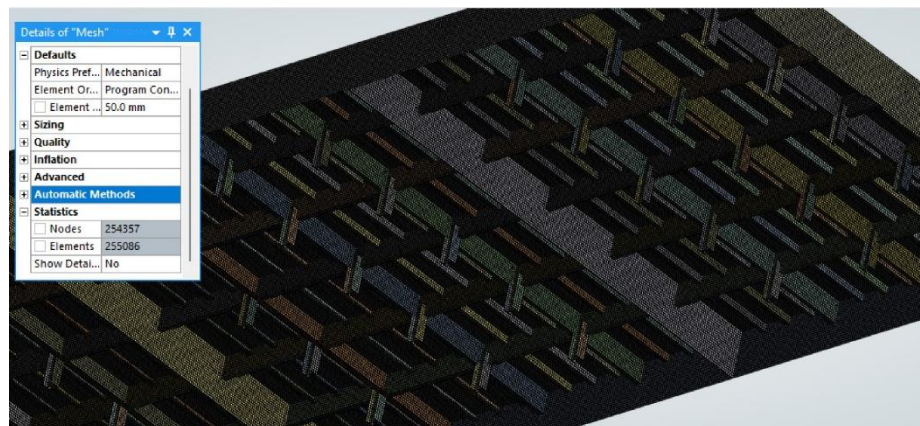
rotasi selama proses pembebanan, sehingga seluruh derajat kebebasan (*degrees of freedom*) pada area tersebut dibatasi. Dengan demikian, pergerakan struktur yang tidak realistis selama simulasi dapat dihindari, sehingga respons struktur yang diperoleh dari hasil analisis mampu merepresentasikan perilaku struktur secara lebih akurat sesuai dengan kondisi operasionalnya. Selanjutnya, pembebanan berupa *force* diberikan pada permukaan atas pelat geladak dengan arah menuju sumbu negatif Z. Beban diterapkan pada tiga area permukaan, dengan area bagian tengah menerima beban yang lebih besar, sedangkan dua area di sisi kiri dan kanan menerima beban yang sama dengan besaran lebih kecil dibandingkan area tengah.



Gambar 8. *Boundary Condition*

4. Pengaturan mesh

Proses *meshing* pada model struktur geladak pada software elemen hingga dengan ukuran elemen global sebesar 50 mm, yang menghasilkan 254.357 node dan 255.086 elemen. Ukuran 50 mm dipilih sebagai kompromi antara ketelitian representasi struktur dan efisiensi komputasi, karena ukuran elemen yang terlalu besar dapat mengurangi ketelitian hasil, sedangkan ukuran yang terlalu kecil meningkatkan jumlah elemen dan waktu komputasi namun dengan hasil yang lebih akurat.



Gambar 9. *Meshing*

3.2 Hasil analisis

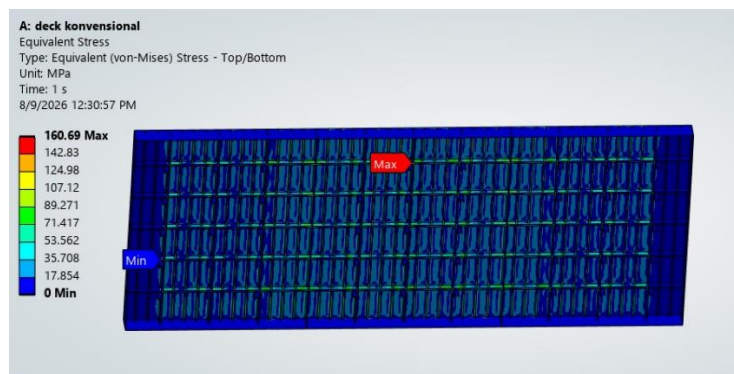
1. Tegangan Von Mises

Tabel 3 menyajikan nilai tegangan Von Mises maksimum yang diperoleh dari hasil analisis pada geladak konvensional dan setiap konfigurasi SPS dengan variasi jumlah dan jarak antar stiffener. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh model menghasilkan nilai tegangan Von Mises maksimum yang masih berada di bawah batas tegangan izin (allowable stress) sebesar 175 MPa berdasarkan ketentuan Lloyd's Register. Geladak konvensional menghasilkan tegangan maksimum sebesar 160,69 MPa, sedangkan model SPS 1, SPS 2, SPS 3, dan SPS 4 masing-masing menghasilkan tegangan maksimum sebesar 79,43 MPa, 79,34 MPa, 80,52 MPa, dan 84,96 MPa. Perbedaan nilai tegangan antar konfigurasi SPS tersebut relatif kecil, sehingga variasi jumlah stiffener tidak menunjukkan perubahan tegangan yang signifikan. Semua konfigurasi SPS juga menghasilkan tegangan di bawah batas tegangan izin sebesar 175 MPa berdasarkan ketentuan Lloyd's Register.

Tabel 3. Maksimum Stress model

Model	Jumlah Stiffener	Stiffener Distance (mm)	Allowable Stress (MPa)	Maximum Stress (MPa)	Status
Deck Konvensional	34	600	175	160,69	Ok
Deck SPS 1	34	600	175	79,43	Ok
Deck SPS 2	22	800	175	79,34	Ok
Deck SPS 3	12	1200	175	80,52	Ok
Deck SPS 4	Without Stiffener	Without Stiffener	175	84,96	Ok

Pada model geladak konvensional dengan jarak stiffener 600 mm, diperoleh tegangan Von Mises maksimum sebesar 160,69 MPa. *Hotspot Stress* terjadi pada bagian tengah geladak akibat area tersebut menerima distribusi beban muatan yang lebih besar dibandingkan bagian lainnya. Tegangan maksimum yang terjadi masih berada dibawah batas tegangan izin.



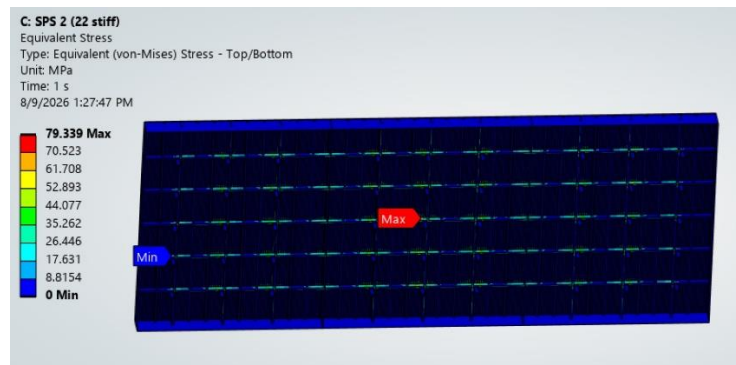
Gambar 10. Tegangan Konvensional

Pada model SPS 1, tegangan Von Mises maksimum sebesar 79,43 MPa, jauh lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 160,69 MPa. Nilai tersebut menunjukkan penurunan tegangan sebesar sekitar 50,57% dibandingkan model konvensional, sehingga penggunaan SPS 1 menghasilkan respons tegangan yang jauh lebih rendah dengan jumlah stiffener yang tetap sama.



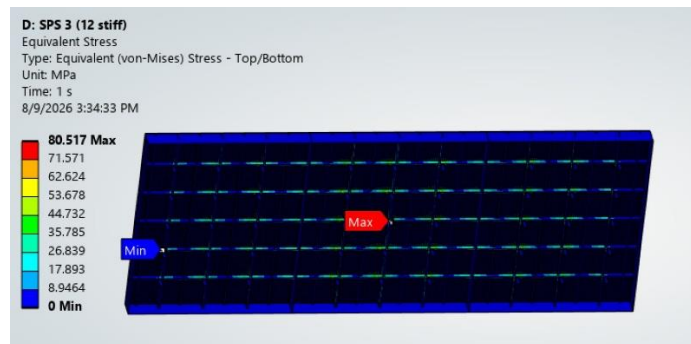
Gambar 11. Tegangan SPS 1

Pada model SPS 2, tegangan Von Mises maksimum yang diperoleh sebesar 79,34 MPa. Nilai tersebut hampir sama dengan SPS 1 sebesar 79,43 MPa, dengan selisih hanya 0,09 MPa. Jika dibandingkan dengan geladak konvensional yang menghasilkan tegangan 160,69 MPa, SPS 2 menunjukkan penurunan tegangan sebesar sekitar 50,65%. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi stiffener pada SPS 2 tidak memberikan perubahan tegangan yang signifikan dibandingkan SPS 1.



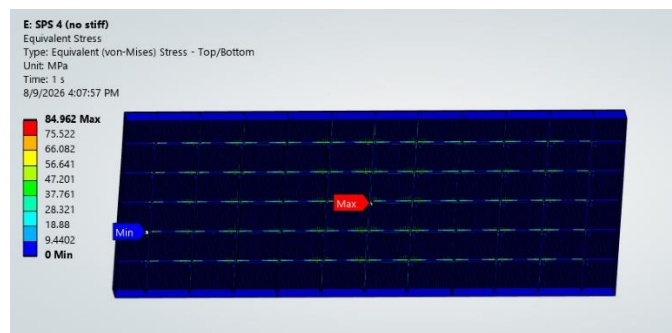
Gambar 12. Tegangan SPS 2

Pada model SPS 3, tegangan Von Mises maksimum sebesar 80,52 MPa. Nilai tersebut masih berada pada rentang yang relatif berdekatan dengan SPS 1 dan SPS 2, yaitu sekitar 79–81 MPa. Dibandingkan dengan geladak konvensional sebesar 160,69 MPa, tegangan pada SPS 3 mengalami penurunan sekitar 49,89%. Dengan demikian, meskipun jumlah stiffener pada SPS 3 telah dikurangi, nilai tegangan yang dihasilkan masih relatif sama dengan konfigurasi SPS sebelumnya.



Gambar 13. Tegangan SPS 3

Pada model SPS 4, yang merupakan konfigurasi tanpa stiffener, tegangan Von Mises maksimum yang diperoleh sebesar 84,96 MPa. Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh konfigurasi SPS, tetapi masih jauh lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 160,69 MPa, dengan penurunan tegangan sekitar 47,13%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penghilangan seluruh stiffener pada SPS 4 menyebabkan sedikit peningkatan tegangan dibandingkan SPS 1–3, tetapi peningkatannya tidak terlalu besar dan nilai tegangan masih berada di bawah batas tegangan izin 175 MPa.



Gambar 14. Tegangan SPS 4

Hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan penelitian terdahulu [10], yaitu variasi jumlah atau jarak stiffener pada konfigurasi SPS menghasilkan nilai tegangan yang relatif berdekatan. Namun, pada penelitian tersebut, konfigurasi tanpa stiffener menunjukkan peningkatan tegangan yang lebih signifikan dibandingkan variasi lainnya. Berbeda dengan hasil tersebut, SPS 4 tanpa

stiffener pada penelitian ini menghasilkan tegangan sebesar 84,96 MPa yang masih relatif berdekatan dengan konfigurasi SPS lainnya. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian [11] dan [12] yang menerapkan SPS tanpa *stiffener* dan menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut tetap menghasilkan tegangan yang lebih rendah dibandingkan model konvensional.

2. Deformasi

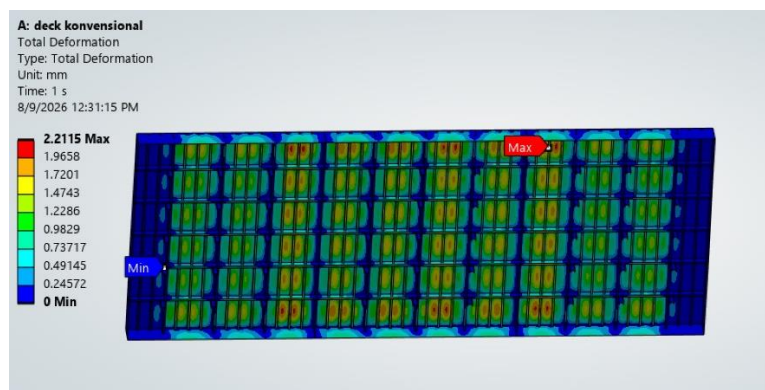
Deformasi merupakan perubahan bentuk atau dimensi suatu struktur akibat gaya atau tegangan yang bekerja. Dalam analisis struktur secara numerik, deformasi merupakan salah satu parameter penting yang perlu diperhatikan. Material yang memiliki tingkat daktilitas tinggi umumnya mampu menahan tegangan yang besar, namun juga cenderung mengalami deformasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengendalian atau pembatasan deformasi menjadi salah satu aspek penting dalam mengevaluasi kinerja struktur.

Pada penelitian ini, Tabel 4 menyajikan nilai deformasi maksimum yang diperoleh dari hasil analisis pada geladak konvensional dan setiap konfigurasi SPS. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi SPS menghasilkan deformasi yang lebih kecil dibandingkan geladak konvensional, yang mengalami deformasi maksimum sebesar 2,210 mm. Nilai deformasi terkecil diperoleh pada SPS 2 sebesar 0,724 mm, sedangkan SPS 1, SPS 3, dan SPS 4 masing-masing menghasilkan deformasi sebesar 0,778 mm, 0,796 mm, dan 0,814 mm. Meskipun jumlah *stiffener* berkurang dan jarak antar-*stiffener* bertambah, perubahan deformasi tidak menunjukkan kecenderungan yang linier. Hal ini menunjukkan bahwa respons deformasi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah dan jarak *stiffener*, tetapi juga oleh mekanisme kerja komposit antara *faceplate* dan *core* yang turut memberikan kekakuan pada struktur.

Tabel 4. Maksimum Deformasi Model

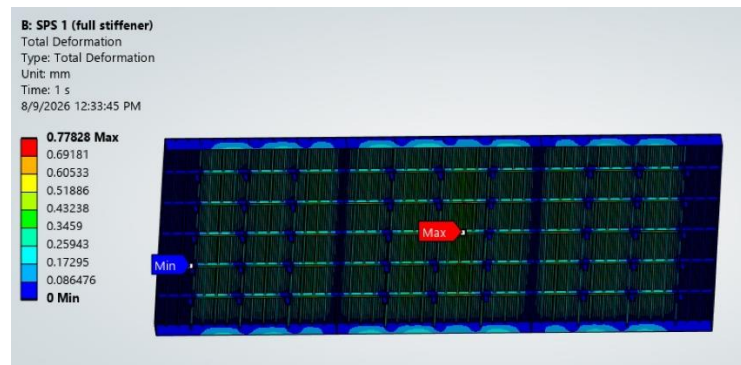
Model	Jumlah <i>stiffener</i>	Jarak <i>Stiffener</i> (mm)	Deformasi Maksimum (mm)
Deck Konvensional	34	600	2,21
Deck SPS 1	34	600	0,778
Deck SPS 2	22	800	0,724
Deck SPS 3	12	1200	0,796
Deck SPS 4	Tanpa <i>stiffener</i>	Tanpa <i>stiffener</i>	0,814

Berdasarkan gambar , geladak konvensional menggunakan 34 *stiffener* dengan jarak antar-*stiffener* sebesar 600 mm dan menghasilkan deformasi maksimum sebesar 2,210 mm. Nilai ini merupakan deformasi terbesar dibandingkan dengan seluruh konfigurasi SPS yang dianalisis.



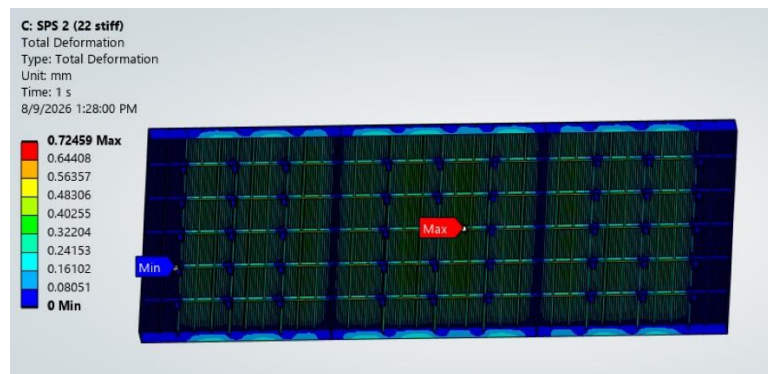
Gambar 15. Deformasi Konvensional

Pada konfigurasi SPS 1 yang menggunakan 34 *stiffener* dengan jarak antar-*stiffener* 600 mm dan menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,778 mm. Dibandingkan dengan geladak konvensional sebesar 2,210 mm, deformasi SPS 1 lebih rendah sebesar 1,432 mm, atau mengalami penurunan sebesar sekitar 64,8%. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan SPS pada konfigurasi dengan jumlah dan jarak *stiffener* yang sama mampu mengurangi deformasi secara signifikan.



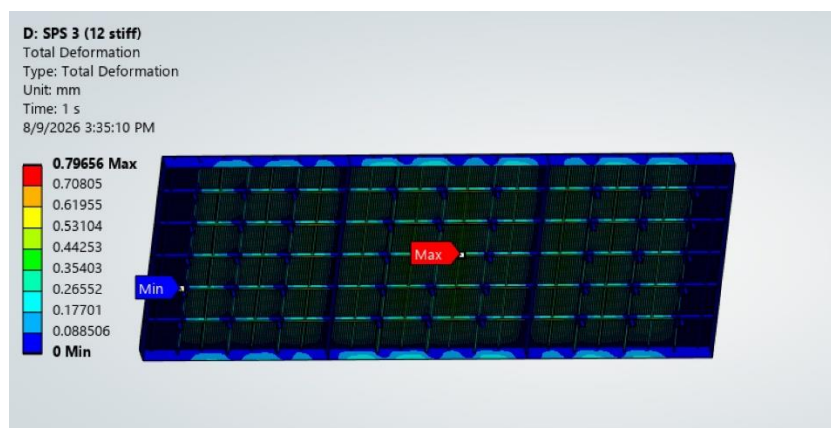
Gambar 16. Deformasi SPS 1

Pada konfigurasi SPS 2, jumlah stiffener dikurangi menjadi 22 buah dengan jarak antar-stiffener sebesar 800 mm. Konfigurasi ini menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,724 mm, lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 2,210 mm. Dengan demikian, terjadi penurunan deformasi sebesar 1,486 mm atau sekitar 67,2%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengurangan jumlah stiffener pada SPS 2 tetap mampu mempertahankan deformasi pada tingkat yang lebih rendah dibandingkan geladak konvensional.



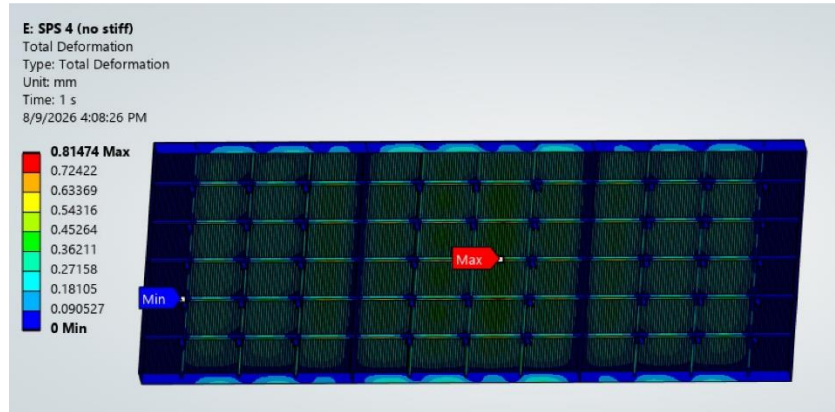
Gambar 17. Deformasi SPS 2

Pada konfigurasi SPS 3, jumlah *stiffener* dikurangi menjadi 12 buah dengan jarak antar-*stiffener* sebesar 1.200 mm. Konfigurasi ini menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,796 mm, lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 2,210 mm. Dengan demikian, terjadi penurunan deformasi sebesar 1,414 mm atau sekitar 64,0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun jumlah *stiffener* dikurangi secara signifikan, deformasi SPS 3 tetap lebih rendah dibandingkan geladak konvensional.



Gambar 18. Deformasi SPS 3

Pada konfigurasi SPS 4, stiffener dihilangkan sepenuhnya sehingga model tidak menggunakan stiffener. Konfigurasi ini menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,814 mm, lebih rendah dibandingkan geladak konvensional sebesar 2,210 mm. Dengan demikian, terjadi penurunan deformasi sebesar 1,396 mm atau sekitar 63,2%. Meskipun tanpa stiffener, SPS 4 tetap menghasilkan deformasi yang lebih rendah dibandingkan geladak konvensional.



Gambar 19. Deformasi SPS 4

3.3 Rekapitulasi reduksi berat konstruksi

Tabel 5. Berat geladak

Item	Jumlah	A (m ²)	t (mm)	V (m ³)	W (V×ρ)	Total W (ton)
Konvensional						
Pelat baja	1	296,244	14	4,147	32,56	32,56
SPS						
Top Plate	1	296,244	3	0,888	6,98	24,27
Corrugated Core	1	446,27	3	1,339	10,51	
Bottom Plate	1	296,244	3	0,888	6,98	

Tabel 5 menunjukkan perbandingan berat geladak antara konstruksi konvensional dan Sandwich Plate System (SPS) dengan U-Corrugated Core. Pada konstruksi konvensional, geladak menggunakan pelat baja setebal 14 mm dengan luas 296,244 m², sehingga diperoleh berat sebesar 32,56 ton. Sementara itu, konfigurasi SPS terdiri atas top plate, corrugated core, dan bottom plate diperoleh berat top plate sebesar 6,98 ton, corrugated core sebesar 10,51 ton, dan bottom plate sebesar 6,98 ton, sehingga total berat geladak SPS adalah 24,27 ton. Dengan demikian, penerapan SPS menghasilkan selisih berat sebesar 8,29 ton atau sekitar 25,43% lebih ringan dibandingkan konstruksi geladak konvensional.

Tabel 6. Berat reduksi *stiffener*

Model	Jumlah <i>stiffener</i>	A (m ²)	t (mm)	V (m ³)	W (<i>Stiffener</i>)	W geladak	W total	Berat akhir (ton)	Berat reduksi (%)
Deck Konvensional	34	20,088	9	6,147	48,26 ton	32,56 ton	80,82 ton	-	-
SPS 1	34			6,147	48,26 ton	24,27 ton	72,53 ton	-8,29	10,26
SPS 2	22			3,977	31,22 ton		55,49 ton	-25,33	31,34
SPS 3	12			2,170	17,04 ton		41,31 ton	-39,51	48,89
SPS 4	Tanpa <i>Stiffener</i>			0	0		24,27 ton	-56,55	69,97

Berdasarkan Tabel 6, pengurangan jumlah *stiffener* memberikan pengaruh terhadap berat total konstruksi geladak. Geladak konvensional dengan 34 *stiffener* memiliki berat total sebesar 80,82 ton sebagai kondisi acuan. Pada konfigurasi SPS 1, jumlah *stiffener* tetap 34 buah, namun penggunaan panel SPS menurunkan berat total menjadi 72,53 ton, sehingga diperoleh pengurangan berat sebesar 8,29 ton atau 10,26% dibandingkan dengan geladak konvensional. Selanjutnya, pengurangan jumlah *stiffener* menjadi 22 buah pada SPS 2 menurunkan berat total menjadi 55,49 ton, dengan pengurangan berat sebesar 25,33 ton atau 31,34%. Pada SPS 3, jumlah *stiffener* dikurangi menjadi 12 buah sehingga berat total menjadi 41,31 ton, atau berkurang sebesar 39,51 ton (48,89%) dibandingkan dengan geladak konvensional. Sementara itu, SPS 4 tidak menggunakan *stiffener* sehingga menghasilkan berat total paling rendah, yaitu 24,27 ton, dengan pengurangan berat konstruksi geladak lokal sebesar 56,55 ton atau 69,97% dibandingkan dengan geladak konvensional.

Penurunan berat total konstruksi dipengaruhi oleh berkurangnya jumlah *stiffener* serta penggunaan panel SPS yang memiliki berat lebih rendah dibandingkan konstruksi geladak konvensional. Berdasarkan Tabel 6, semakin sedikit jumlah *stiffener* yang digunakan, semakin besar pengurangan berat total yang diperoleh, dengan SPS 4 tanpa *stiffener* menghasilkan pengurangan berat terbesar, yaitu 69,97%. Namun demikian, pengurangan berat tidak dapat hanya ditinjau dari aspek massa struktur, tetapi juga perlu mempertimbangkan respons struktur terhadap pembebanan untuk memastikan konfigurasi yang digunakan tetap memenuhi kriteria kekuatan dan kekakuan struktur. Hal ini penting karena perubahan konfigurasi dan jumlah *stiffener* dapat memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi pada struktur, sehingga respons struktur perlu ditinjau terhadap variasi pembebanan selain hanya pembebanan statis untuk mengetahui kinerja masing-masing konfigurasi pada kondisi pembebanan yang berbeda.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 6, penerapan Sandwich Plate System (SPS) pada geladak kapal tongkang 320 kaki mampu mengurangi berat konstruksi dengan tetap mempertahankan tegangan di bawah allowable stress sebesar 175 MPa. Model SPS 2 dengan 22 *stiffener* dan jarak antar-*stiffener* 800 mm dapat dianggap sebagai konfigurasi yang paling optimal karena memberikan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan efisiensi berat, dengan tegangan maksimum sebesar 79,34 MPa, deformasi maksimum sebesar 0,724 mm, serta pengurangan berat sebesar 25,33 ton atau 31,34% dibandingkan geladak konvensional. SPS 3 dengan 12 *stiffener* memberikan pengurangan berat yang lebih besar, yaitu 39,51 ton atau 48,89%, namun mengalami peningkatan tegangan dan deformasi dibandingkan SPS 2. Sementara itu, SPS 4 tanpa *stiffener* menghasilkan pengurangan berat terbesar, yaitu 56,55 ton atau 69,97%, tetapi juga memiliki tegangan dan deformasi tertinggi di antara seluruh model SPS, masing-masing sebesar 84,96 MPa dan 0,814 mm. Dengan demikian, SPS 2 dipilih sebagai konfigurasi paling optimal karena memberikan kompromi yang lebih seimbang antara pengurangan berat dan respons struktur, sedangkan SPS 3 dan SPS 4 lebih unggul dari aspek efisiensi berat tetapi menghasilkan respons deformasi dan tegangan yang lebih tinggi.

Untuk penelitian selanjutnya, analisis dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan variasi pembebanan yang lebih beragam, seperti beban dinamis dan beban gelombang, serta analisis buckling dan jenis analisis struktural lainnya, sehingga kinerja struktur dapat dievaluasi pada kondisi pembebanan yang lebih mendekati kondisi operasional kapal. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan variasi konfigurasi dan material SPS untuk memperoleh desain yang lebih efisien dari aspek kekuatan, deformasi, dan pengurangan berat konstruksi. Dengan demikian, pengembangan penelitian SPS diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi geladak yang lebih optimal dan aplikatif dalam mendukung efisiensi konstruksi kapal.

5 Daftar Pustaka

- [1] T. Tuswan, A. Rezaldy, O. Mursid, H. Yudo, and A. Rio Prabowo, "Application of Sandwich Plate System (SPS) on 155 m Barge: Framing System Configuration, Weight saving, and Dynamic Characteristic Assessment," *Naše more*, vol. 70, no. 1, pp. 58–76, Mar. 2023, doi: 10.17818/NM/2023/1.6.
- [2] A. Ismail, A. Zubaydi, B. Piscesa, and T. Tuswan, "A novel fiberglass-reinforced polyurethane elastomer as the core sandwich material of the ship-plate system," *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 32, no. 1, Jun. 2023,

doi: 10.1515/jmbm-2022-0288.

- [3] N. P. L. Sukma, A. Zubaydi, R. C. Ariesta, H. Anjasmara, A. Ismail, and T. Tuswan, "Numerical Investigation of the Strength Assessment and Weight Reduction Sandwich Panel System on Barge Ship Structure," *Trans. Marit. Sci.*, vol. 14, no. 3, Jul. 2025, doi: 10.7225/toms.v14.n03.w06.
- [4] P. Y. Arianto, R. A. Zharo, H. I. D. Puspita, M. Kadhafi, and S. Syafiuddin, "Finite Element Analysis to Determine the Optimum Stiffener Spacing on Barge Deck with 5-15-5 Sandwich Plates," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 22, no. 3, pp. 187–196, Nov. 2025, doi: 10.14710/kapal.v22i3.74747.
- [5] V. N. Perkasa, S. A. Djamarel, and H. Hermanto, "Modification of the main deck of PC40 using the Sandwich Plate System to support marine defense operations," *Journal Research of Social Science, Economics, and Management*, vol. 1, no. 7, pp. 767–773, 2022, doi: 10.59141/jrssem.v1i7.88.
- [6] T. Adolfsson, *Element to Element Joints of Corrugated Core Steel Sandwich Bridge Decks*, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [7] M. D. U. Haq, "Analisis Three-Point Bending Panel Sandwich U-Beam Corrugated Core pada Kapal Tugboat dengan Pendekatan Numerik," Tugas Akhir, Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2025.
- [8] T. Adolfsson, "Element to element joints of corrugated core steel sandwich bridge decks," Master's thesis, Dept. Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [9] Llyod's Register, "Rules and Regulations for the Classification of Ships," *Llyod's Regist. UK*, 2021.
- [10] P. Y. Arianto, R. A. Zharo, H. I. D. Puspita, M. Kadhafi, and S. Syafiuddin, "Finite Element Analysis to Determine the Optimum Stiffener Spacing on Barge Deck with 5-15-5 Sandwich Plates," *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 22, no. 3, pp. 187–196, Nov. 2025, doi: 10.14710/kapal.v22i3.74747.
- [11] H. Siswanti, M. Musta'in, A. M. Mulananda, A. Nasrudin, and D. R. Aldara, "Influence of faceplate thickness reduction on the strength of sandwich structure under static compression loading," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1423, no. 1, p. 012034, Dec. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1423/1/012034.
- [12] A. Baidowi, E. Utomo, F. D.K., and H. Indria, "Penggunaan Sandwich Plate System (SPS) pada Konstruksi Inner Bottom," *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 12, no. 2, pp. 60–68, Jun. 2015, doi: 10.14710/kpl.v12i2.8348.