



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Kekuatan Torsional Variasi Material *Sandwich Plate System* pada *Cargo Hold* Kapal *Container DWT 7537*

Dimas Bosty Alfarizki¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki²⁾, Hartono Yudo³⁾

¹⁾Laboratorium struktur dan konstruksi kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl.
Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : dimasbosty@students.undip.ac.id

Abstrak

Inovasi dalam desain struktur kapal bertujuan untuk menghasilkan konstruksi yang ringan, kuat, dan efisien. Salah satu teknologi yang digunakan adalah *Sandwich Plate System (SPS)*, yaitu sistem pelat berlapis dengan material inti yang berfungsi meningkatkan kekuatan tanpa menambah berat secara signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan torsional struktur *Cargo hold* kapal menggunakan variasi material inti pada *SPS*. Simulasi numerik dilakukan dengan metode elemen hingga (*FEM*) menggunakan perangkat lunak *Abaqus CAE*. Material inti yang diteliti berupa elastomer dan *synthetic resin*, serta dibandingkan dengan struktur konvensional. Hasil analisis menunjukkan bahwa *SPS* dengan inti elastomer menghasilkan tegangan von Mises sebesar 3,87 MPa dan defleksi 29,64 mm. Sementara itu, *SPS* dengan inti *synthetic resin* menghasilkan tegangan 3,86 MPa dan defleksi 29,64 mm. Seluruh konfigurasi tersebut memenuhi standar kekuatan struktur berdasarkan kriteria dari Biro Klasifikasi Indonesia (*BKI*). Dengan demikian, penggunaan *SPS* dengan material inti elastomer maupun *synthetic resin* dinilai layak sebagai alternatif pengganti pelat baja konvensional dalam struktur kapal modern.

Kata Kunci : *FEM, Sandwich Plate System, Strength Analysis, Composite Structure*

1. PENDAHULUAN

Kapal adalah moda transportasi yang dapat mengangkut banyak orang dan barang secara efisien. Teknologi saat ini diharapkan dapat menghasilkan kapal yang cepat, ringan, dan mampu mengangkut muatan besar dengan tingkat keselamatan yang tinggi saat berlayar maupun bersandar. Konstruksi kapal yang ringan dan kuat membutuhkan pembaruan yang lebih efisien serta efektif. Dalam pengaplikasiannya pada konstruksi kapal, sistem konstruksi yang ringan akan meningkatkan kecepatan kapal dan memungkinkan kapal niaga mengangkut lebih banyak muatan.

Dalam konstruksi kapal, salah satu inovasi yang diterapkan adalah *SPS*. Dari hasil analisis struktur kapal, penggunaan *SPS* terbukti dapat menyederhanakan konstruksi geladak tanpa mengurangi kekuatan strukturnya. *SPS* merupakan suatu sistem struktur komposit yang

terdiri atas dua pelat baja yang dipisahkan oleh suatu lapisan inti dengan sifat material yang berbeda [1]. Pelat baja dibuat menggunakan material berkekuatan tinggi dan berkekakuan tinggi, yang berfungsi untuk menahan tegangan utama akibat beban struktural [2].

Di sisi lain, lapisan inti berperan sebagai elemen pendistribusi beban geser dan penstabil terhadap pelat dengan karakteristik kekuatan, kekakuan, dan densitas yang lebih rendah [3]. Pemilihan material inti sangat bergantung pada kebutuhan performa struktur dan dapat menggunakan bahan komposit non-logam seperti busa polimer, poliuretan, atau kayu balsa, serta alternatif berbahan logam seperti baja atau aluminium [4].

SPS menggantikan pelat logam bertulang konvensional dengan laminasi baja-elastomer-baja, sehingga tidak lagi memerlukan penambahan penegar dan dapat mengurangi risiko tekuk lokal

pada pelat. Selain itu, struktur yang lebih sederhana ini memungkinkan proses konstruksi dan perbaikan dilakukan dengan lebih cepat dan mudah, karena mengurangi kebutuhan akan pekerjaan perataan serta pengelasan yang biasanya diperlukan dalam pemasangan penegar [5].

Struktur SPS ini dirancang untuk mengoptimalkan kinerja mekanis, khususnya dalam meningkatkan kekakuan lentur dan ketahanan terhadap kegagalan lokal, tanpa memberikan kontribusi massa yang berlebihan. Oleh karena itu, SPS banyak diadopsi dalam berbagai aplikasi teknik sipil, maritim, dan transportasi, di mana rasio kekuatan terhadap berat menjadi parameter desain yang krusial [6].

Berdasarkan analisis kekuatan struktur pada kapal kargo, bulk carrier, dan kapal kontainer dalam penelitian sebelumnya yang menerapkan pelat *sandwich*, struktur yang dianalisis dalam penelitian ini difokuskan pada bagian midship kapal dengan berbagai model sistem rangka, yaitu *longitudinal*, *transversal*, dan campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pelat SPS mampu mengurangi berat struktur tanpa melebihi 15%, dengan penurunan berat relatif berkisar antara 5–8% dibandingkan dengan penggunaan pelat konvensional [7].

SPS memiliki rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, dengan inti elastomer poliuretan yang efektif dalam mentransfer gaya geser dan lentur, menyerap energi regangan, serta mengurangi konsentrasi beban, sehingga meminimalkan risiko deformasi dan kelelahan [8].

Penggunaan struktur SPS dalam pembangunan kapal telah diatur dalam ketentuan klasifikasi Lloyd's Register (LR) melalui *Provisional Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure* [9]. Beberapa aspek yang dibahas dalam aturan tersebut antara lain mencakup penerapan SPS pada konstruksi baru maupun konstruksi overlay. Selain itu, LR juga menetapkan standar ketebalan minimum untuk pelat logam bagian atas dan bawah, serta ketebalan minimum inti.

Penelitian ini juga mengaplikasikan konsep Metode Elemen Hingga. Metode Elemen Hingga merupakan metode numerik yang digunakan

untuk memperoleh solusi dari permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa maupun persamaan diferensial parsial [10]. Setiap elemen dianalisis dengan mempertimbangkan beban yang bekerja, sifat material, serta kondisi batas tertentu. Metode ini digunakan untuk menghitung tegangan *von Mises*. Suatu material dianggap aman apabila tegangan *von Mises* (σ_{vm}) lebih kecil daripada tegangan luluh material (σ_y) [11].

Salah satu penelitian yang menguji konsep SPS dengan metode elemen hingga yakni melakukan optimasi topologi lapisan inti *magnetorheological elastomer* dalam *sandwich plate* adaptif menggunakan metode *finite element* dan optimasi desain berbasis *Solid Isotropic Material with Penalization* dan *Method of Moving Asymptotes*. Hasil validasi menunjukkan tingkat akurasi tinggi dibandingkan studi terdahulu, serta mampu menurunkan dynamic compliance secara signifikan di berbagai kondisi batas, frekuensi pembebanan, dan fraksi volume [12].

Abedin, dkk mempelajari tentang defleksi longitudinal dan defleksi transversal dari *hull girder* kapal *general cargo* secara memanjang menggunakan Metode Elemen Hingga dengan bantuan *software* NX Nastran. Eksperimen ini dilakukan pada 3 kondisi gelombang, yakni *sagging*, *hogging* dan *beam sea*. Studi ini menyimpulkan bahwa defleksi longitudinal lebih signifikan dibandingkan defleksi transversal pada *hull girder* [13].

Secara umum kekuatan torsional mengacu pada kemampuan suatu struktur atau material untuk menahan gaya puntir terhadap sumbu longitudinalnya. Sifat ini sangat penting dalam berbagai aplikasi, termasuk struktur beton dan balok komposit, di mana gaya torsional dapat menyebabkan tegangan signifikan dan berpotensi mengakibatkan kegagalan struktural [14]. Kekuatan torsional pada balok komposit baja-beton dipengaruhi oleh interaksi antara pelat beton dan balok baja. Pelat beton berperan utama dalam memberikan ketahanan terhadap puntiran, sedangkan balok baja membantu menahan deformasi longitudinal, sehingga meningkatkan kekuatan torsional secara keseluruhan [15].

Kapal kontainer, terutama yang memiliki bukaan dek besar, menghadapi tantangan struktural yang signifikan akibat kombinasi momen lentur dan momen torsi, terutama saat berlayar di laut miring. Kekuatan ultimat kapal-kapal ini dipengaruhi oleh kedua jenis momen

tersebut, yang dapat menyebabkan perilaku keruntuhan progresif dalam kondisi ekstrem. Korosi dan ketidaksempurnaan pada sambungan las semakin memperumit integritas struktural, mengurangi kekuatan ultimat dan menuntut perawatan serta penilaian yang cermat [16].

Berbagai penelitian telah dilakukan pada berbagai jenis kapal dan menganalisa pengaruh momen lentur dan momen puntir terhadap kekuatan kapal. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa bukaan geladak besar pada kapal kontainer secara signifikan menurunkan kekakuan torsi dan mempercepat terjadinya keruntuhan global. Kegagalan utama terjadi melalui *buckling* pada sisi tekan, *tensile yielding* pada sisi tarik, dan akumulasi tegangan *warping* di sudut palka hingga mencapai kondisi batas [17]. Penelitian lain juga melibatkan kapal kontainer dengan menggunakan teori kesebangunan geometri dan kekuatan yang mana peneliti merancang dan menganalisis model skala kapal. Penelitian menunjukkan hasil uji kekuatan torsional model skala mampu merepresentasikan perilaku kapal kontainer secara akurat, dengan distribusi tegangan, mode keruntuhan, serta kurva beban dan deformasi yang sangat sesuai dengan kapal nyata [18].

Lebih lanjut, interaksi antara tegangan lentur vertikal dan torsional harus diperhitungkan secara menyeluruh. Penelitian telah menghasilkan persamaan interaksi kekuatan ultimat untuk kondisi pembebanan kombinasi lentur dan torsi [19]. Persamaan ini membantu dalam memprediksi respons torsional kapal dan menjaga integritas strukturalnya di bawah kondisi pembebanan kompleks [20]. Dengan demikian, metode analisis lanjutan berbasis FE dan pemahaman interaksi tegangan menjadi kunci dalam menilai kekuatan torsional kapal kontainer modern secara akurat.

Seiring bertambahnya ukuran kapal, terutama kapal kontainer modern dengan bukaan dek yang lebar, momen puntir menjadi isu kritis dalam desain struktur kapal [21]. Penelitian mutakhir mengintegrasikan model numerik canggih seperti Metode Elemen Hingga dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis respons kapal terhadap kombinasi momen lentur dan puntir, serta mengevaluasi interaksi keduanya dalam kondisi ekstrem [22].

Penggunaan SPS pada struktur kapal tidak hanya meningkatkan kekuatan lentur, tetapi juga memperbaiki ketahanan terhadap momen puntir

[23]. Studi analitik dan simulasi menunjukkan bahwa penambahan SPS pada lambung dan dek kapal mampu mengurangi deformasi puntir, meningkatkan kekakuan global, serta memperpanjang umur pakai struktur [24]. Selain itu, implementasi sistem monitoring berbasis getaran dan sensor cerdas pada SPS memungkinkan deteksi dini kerusakan akibat momen puntir, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional kapal [25]. Selain itu Struktur SPS memiliki kekakuan lentur dan kekuatan terhadap densitas yang tinggi, sehingga cocok untuk aplikasi penggunaan material yang ringan namun kuat [26].

Dalam penerapannya SPS dapat dipilih apabila memenuhi kondisi dan disesuaikan dengan jenis pelat yang akan digunakan. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan adalah ketebalan pelat yang akan mempengaruhi kekuatan torsional dan kekuatan struktur [27]. Selain itu dapat dipertimbangkan dengan melihat material inti pada SPS yang mana dapat mempengaruhi karakteristik kekuatan SPS [28].

Penelitian terkini terus mengembangkan material inti baru, metode optimasi struktur, serta integrasi teknologi *monitoring* cerdas untuk meningkatkan performa SPS pada aplikasi kelautan [29]. Tantangan utama ke depan meliputi pengembangan alat desain yang komprehensif, validasi eksperimental skala penuh, serta penyesuaian terhadap regulasi klasifikasi kapal yang semakin ketat [30]. Dengan kemajuan ini, SPS diproyeksikan menjadi solusi utama untuk struktur kapal masa depan yang lebih ringan, kuat, dan tahan terhadap beban ekstrem, termasuk momen puntir yang semakin signifikan pada kapal modern.

Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini akan membahas mengenai penggunaan material inti SPS yang dianalisis secara numerik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbandingan kekuatan torsional pada struktur konstruksi konvensional dengan SPS yang mencakup deformasi, berat konstruksi dan nilai tegangan untuk mencegah bahaya yang mungkin dapat terjadi pada konstruksi ruang muat kapal ketika diberi beban puntir.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Kapal kontainer merupakan jenis kapal yang dirancang khusus untuk mengangkut barang-

Kapal ini memiliki struktur dan tata ruang muat yang telah dioptimalkan untuk mengakomodasi kontainer berukuran standar internasional, seperti kontainer 20 kaki dan 40 kaki. Dengan sistem ini, kegiatan bongkar muat di pelabuhan menjadi lebih cepat dan efisien.

Gambar 1 merupakan Main Transverse Plan kapal yang merupakan acuan penelitian ini. Konstruksi kapal yang digunakan merupakan konstruksi kapal memanjang yang menggunakan struktur longitudinal. Rencana konstruksi juga merincikan ketebalan pelat yang digunakan pada konstruksi.

Dimensi	Nilai
<i>Length Overall (LOA)</i>	98 m
<i>Length Between Perpendicular (LPP)</i>	92 m
<i>Breadth (B)</i>	21 m
<i>Depth (h)</i>	8.2 m
<i>Draft (t)</i>	6,2 m
<i>Speed (Vs)</i>	11.3 kn
<i>Deadweight (DWT)</i>	7537 t

Komponen	Spesifikasi
<i>Bottom Longitudinal</i>	200×10 mm
<i>Inner Bottom Longitudinal</i>	180×10 mm
<i>Inner Side Longitudinal</i>	200×10 mm
<i>Inner Side Longitudinal</i>	160×9 mm
<i>Inner Side Longitudinal</i>	180×14 mm

The diagram illustrates the difference in hull cross-sections between a Modified Midship and a Conventional Midship. The Modified Midship (top) features a wider, more rounded bow and a narrower, more rectangular stern. The Conventional Midship (bottom) has a narrower bow and a wider, more rectangular stern. The diagrams show the internal structure of the hull, including the keel, ribs, and deck.

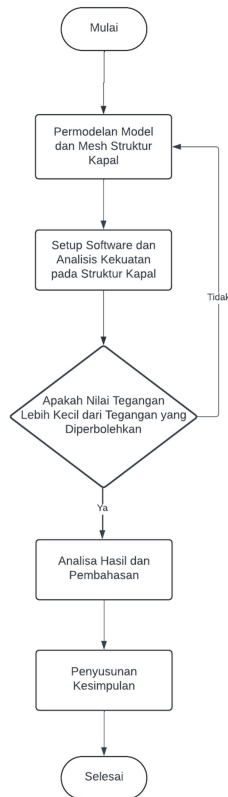
Gambar 2 memperlihatkan perbandingan antara konstruksi kapal konvensional dan konstruksi hasil modifikasi dengan menggunakan SPS. Pada konstruksi konvensional, keseluruhan struktur kapal menggunakan material baja, termasuk pada bagian inner bottom longitudinal. Sedangkan pada modifikasi konstruksi dengan menggunakan SPS, perubahan utama dilakukan dengan mengganti inner bottom plate dari material baja menjadi material SPS. Ketebalan SPS yang akan digunakan adalah 25mm dengan pelat baja atas setebal 5 mm, inti sps setebal 15 mm dan pelat baja bawah setebal 5 mm.

Jurnal Teknik Perkapalan, Vol 13, No 4 (2025): Oktober

dipertahankan secara optimal. Desain ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi struktural dan performa kapal secara umum, terutama dalam hal pengurangan bobot dan kemudahan fabrikasi.

2.2. Proses *modeling* Geometri dan *Element Meshing*

Metode elemen hingga teknik penyelesaian berbasis perhitungan numerik yang digunakan untuk menganalisis model struktural. Salah satu aspek krusial dalam metode ini adalah pemodelan geometri spesimen. Dalam penelitian ini, model geometri yang dianalisis merupakan konstruksi *cargo hold* pada kapal. Geometri tersebut dirancang berdasarkan gambar konstruksi yang telah tersedia. Gambar 3 merupakan flowchart proses penelitian.



Gambar 3. Flowchart Proses Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti alur yang terstruktur sebagaimana ditunjukkan dalam flowchart pada Gambar 3. Proses penelitian ini dimulai dengan pemodelan dan pembuatan mesh struktur kapal, kemudian dilanjutkan dengan pengaturan *software* dan analisis kekuatan struktur untuk mengevaluasi nilai tegangan yang

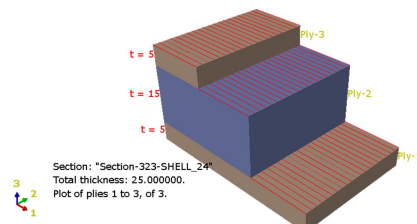
terjadi. Jika tegangan yang dihasilkan melebihi batas yang diperbolehkan, maka proses pemodelan diulang hingga diperoleh hasil yang valid. Setelah nilai tegangan berada dalam batas aman, dilakukan analisis hasil dan pembahasan untuk memahami kinerja struktur. Tahap akhir adalah penyusunan kesimpulan yang merangkum temuan dari keseluruhan proses penelitian.

Ukuran mesh dalam analisis FEM memiliki peran penting dalam menentukan ketelitian hasil. Untuk memperoleh mesh yang terstruktur rapi dan hasil simulasi yang tinggi akurasi, proses meshing dilakukan secara terpisah pada setiap bagian model. Karena sebagian besar bagian berbentuk balok, maka pada tugas akhir ini digunakan jenis mesh quad-structured. Dalam analisis ini, elemen-elemen seperti Pelat, lapisan inti, dan penegar dimodelkan menggunakan elemen material shell tipe S4R. Pemilihan elemen ini didasarkan pada kemampuannya mempertahankan akurasi tinggi sekaligus mempercepat waktu komputasi.

Pada konstruksi ruang muat kapal yang digunakan dalam penelitian ini, pelat utama dalam konstruksi konvensional memiliki ketebalan 10 mm, longitudinal berbentuk L berukuran 180x10x10 mm, dan Longitudinal berbentuk I berukuran 180x14x14 mm. Dimensi keseluruhan ruang muat yang dianalisis adalah 28500 mm x 21000 mm.

2.3. Variasi Konstruksi SPS

Pada penelitian ini terdapat 3 variasi ruang muat yang dibuat yaitu konvensional, ruang muat menggunakan sps berbahan inti *Elastomer* dan ruang muat menggunakan sps berbahan inti *Synthetic Resin*. Gambar 4 merupakan bentuk model variasi inti SPS pada penelitian ini.



Gambar 4. Model Variasi SPS

Pada Gambar 4 dirincikan lapisan variasi material inti SPS dengan pembuatan model variasi inti SPS tersebut menggunakan orientasi struktur

0° sehingga membentuk struktur yang lurus. Total ketebalan seluruh pelat menjadi 25 mm. Untuk ketebalan pelat material SPS yang dimodelkan yaitu 25 mm dengan konfigurasi yaitu pelat baja 5 mm, 15 mm inti SPS dan pelat baja 5 mm sesuai dengan standar yang tertera pada LR 2015 [9].

2.3. Pendefinisian Material

Pada penelitian ini, jenis material yang digunakan adalah besi sebagai material utama konstruksi konvensional dan pelat pada konstruksi SPS dengan Tabel 3 merupakan *Material Properties* dari masing-masing material pada penelitian yang diambil berdasarkan penelitian terdahulu menggunakan material serupa. *material properties* dari *Elastomer* mengacu pada penelitian tentang studi penerapan SPS pada kapal tanker [31]. Begitu pula *material properties* dari *Synthetic Resin* mengacu pada penelitian tentang studi penerapan SPS pada kapal *Landing Ship Tank* [32].

Tabel 3. Material Properties Penelitian

Dimensi	Steel	Elastomer	Synthetic Resin
Density (kg/m ³)	7850	1098	1728
Young's Modulus (MPa)	2,1 x 10 ⁵	901	2792
Poisson's Ratio	0,5	0,4	0,001
Yield stress (MPa)	568,6	16.1	8.5

Berdasarkan Tabel 3, material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga jenis, yaitu steel (baja), elastomer, dan resin, masing-masing dengan karakteristik material yang berbeda. Baja digunakan sebagai material utama pelat karena memiliki densitas sebesar 7850 kg/m³, *Young's Modulus* sebesar 2,1 × 10⁵ MPa, dan *yield stress* sebesar 568,6 MPa, Sementara itu, elastomer memiliki densitas yang jauh lebih rendah, yaitu 1098 kg/m³, dengan *Young's Modulus* 901 MPa dan *yield stress* 16,1 MPa, menunjukkan sifat material yang lebih elastis dan fleksibel serta ringan. Resin memiliki densitas 1728 kg/m³, *Young's Modulus* 2792 MPa, dan *yield stress* 8,5 MPa. Variasi sifat mekanik ini dipertimbangkan dalam analisis struktur untuk memastikan kombinasi material dapat memenuhi persyaratan kekuatan dan fleksibilitas struktur secara optimal.

2.4. Momen puntir kapal

Perhitungan momen puntir kapal mengacu pada aturan BKI Rules for Hull Vol. II 2019 [33], yang memberikan rumus untuk menentukan momen puntir maksimum yang mungkin terjadi pada kapal dengan rumus perhitungannya yakni:

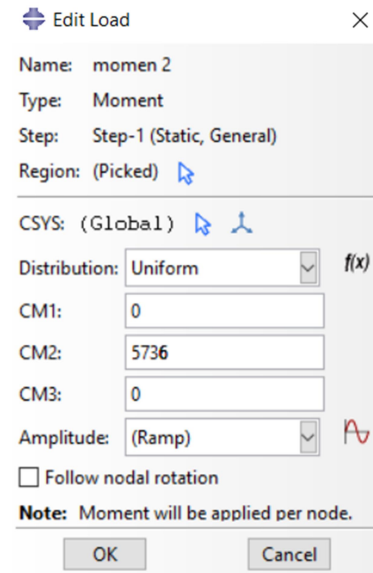
$$MWT = L \cdot B^2 \cdot C_b \cdot C_o \cdot C_l \cdot [0,11 + (\sqrt{a^2 + 0,012})] \quad (1)$$

$$a = [\sqrt{(T/L)}] \times (C_n \cdot Z_q / B) \quad (2)$$

$$C_n = [1 + 0,15 L/B] \quad (3)$$

Z_q = Jarak antara *shear centre* dengan (0,2BxH/T) dari double bottom.

Adapun Z_q merupakan jarak antara shear centre dengan titik referensi yang biasanya terletak pada 0,2 kali lebar (B) dikalikan tinggi lambung (H) terhadap tinggi T dari double bottom. Parameter-parameter lain seperti L (panjang kapal), B (lebar kapal), C_b (koefisien blok), C_o dan C_l (koefisien bentuk dan distribusi beban) ditentukan berdasarkan data geometri dan karakteristik kapal.



Gambar 5. Pengaturan Momen Puntir pada Model

Pengaturan momen puntir yang akan disimulasikan pada *software* dapat terlihat pada Gambar 5 yang mana nilai momen puntir diletakkan pada sumbu Y yang mengarah pada sisi dalam *cargo hold*. Dengan memasukkan hasil perhitungan momen maka proses simulasi dapat memberikan momen puntir yang sesuai pada pengujian model kapal.

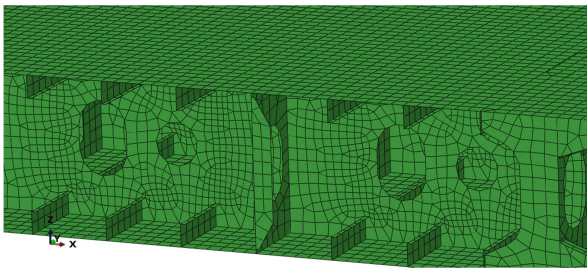
2.5. Pembuatan Model dan Meshing

Dalam penelitian ini, bagian konstruksi yang dimodelkan adalah *cargo hold* (ruang muat) sepanjang 25,8 meter. Pemilihan area tersebut

didasarkan pada kenyataan bahwa bagian itu merupakan titik paling kritis pada struktur kapal, sekaligus dipilih untuk menyederhanakan proses pemodelan.

Pemodelan dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Abaqus CAE* dan *Hypermesh*, sehingga menghasilkan sistem dengan banyak derajat kebebasan (*multi degree of freedom*).

Langkah pertama dari metode ini adalah membuat model atau objek berdasarkan geometri yang sesuai dengan data gambar konstruksi kapal. Selanjutnya, dilakukan proses *meshing* menggunakan elemen dua dimensi (2D). Ukuran tiap elemen ditetapkan sebesar 0,1 meter, dengan total elemen yang dihasilkan sebanyak 461.173 elemen.



Gambar 6. Hasil *Mesh* Geometri *Cargo hold* Kapal Kontainer

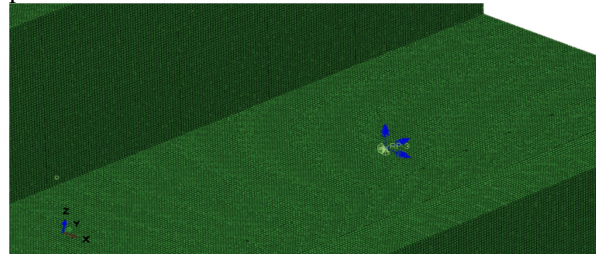
Hasil dari proses *meshing* pada model *cargo hold* kapal kontainer ditampilkan pada Gambar 6. Proses *meshing* ini menghasilkan struktur elemen yang telah terintegrasi secara menyeluruh, sehingga membentuk satu kesatuan model yang dapat dianalisis secara numerik. Untuk memastikan bahwa *mesh* mengikuti kontur dan detail dari geometri model kapal, digunakan opsi *mixed element* pada *software* yang digunakan.

Opsi ini memungkinkan penggabungan berbagai jenis elemen sesuai kebutuhan lokal geometri, sehingga distribusi elemen menjadi lebih fleksibel dan akurat dalam merepresentasikan struktur asli. *Mesh* yang dihasilkan menjadi dasar penting dalam proses simulasi karena mempengaruhi keakuratan hasil analisis tegangan dan deformasi pada tahap selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Penentuan *Boundary Condition*

Langkah awal dalam proses analisis adalah menetapkan kondisi batas (*Boundary Condition*) yang berfungsi sebagai tumpuan tetap, dengan translasi dan rotasi pada sumbu X, Y, dan Z dikunci (*fixed*). Karena analisis yang dilakukan bersifat linier statis, diasumsikan bahwa kapal berada dalam kondisi diam di laut saat menerima beban maksimum. Pembuatan model kapal pada perangkat lunak harus diselesaikan terlebih dahulu, sebelum kemudian dilanjutkan dengan penentuan kondisi batas.



Gambar 7. Proses Penambahan *Boundary Condition*

Gambar 7 menunjukkan hasil dari proses penambahan *Boundary Condition* pada model *cargo hold*, di mana titik atau bidang tertentu telah ditetapkan sebagai area dengan batas gerak nol guna mendukung akurasi dalam analisis tegangan dan deformasi struktur. Penempatan *Boundary Condition* dilakukan pada tengah kapal sebagai bagian dari asumsi kondisi ideal untuk analisis linier statis.

Boundary Condition dalam analisis ini menggunakan jenis *Displacement/Rotation*, di mana sumbu translasi X (U1), Y (U2), dan Z (U3) dikunci dengan memberikan nilai nol, sehingga tidak terjadi perpindahan pada ketiga arah tersebut. Sebaliknya, sumbu rotasi UR1, UR2, dan UR3 diberikan nilai satu untuk memungkinkan adanya rotasi pada ketiga sumbu tersebut. Dengan konfigurasi ini, model dikondisikan agar tetap diam pada posisinya dalam ruang (tidak mengalami translasi), namun tetap dapat berotasi, yang merupakan pendekatan umum dalam analisis struktur untuk menyimulasikan kondisi batas yang realistis, seperti tumpuan elastis atau kondisi tertentu pada struktur kapal.

3.2. Validasi

Validasi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana tingkat ketelitian geometri elemen hingga yang telah dirancang. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan

mencocokkan bentuk geometris kapal asli dengan model kapal yang dibangun dalam perangkat lunak analisis elemen hingga (FEA).

Dalam hal ini untuk memastikan ketelitian geometri elemen maka dilakukan Perhitungan Analitik dan perhitungan *Software*. Dengan membandingkan hasil dari kedua perhitungan tersebut kita dapat mengetahui tingkat ketelitian model.

3.2.1 Perhitungan Analitik

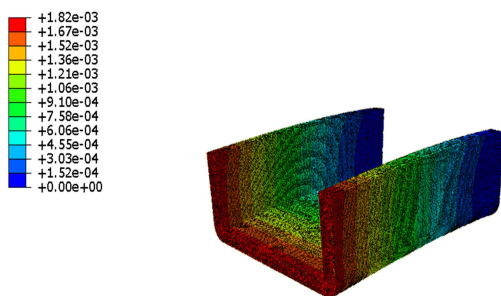
Perhitungan secara analitik yaitu dengan menggunakan pendekatan rumus defleksi mekanika teknik.

$$Defleksi = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I} \quad (4)$$

F yaitu *Force* (N), L adalah Panjang model (mm), E adalah Modulus Elastisitas (MPa) dan I adalah Inersia (mm⁴). Maka dapat dilihat bahwa defleksi yang terjadi adalah sebesar 1,744 mm atau 0,001744 m.

3.2.2 Perhitungan *Software*

Perhitungan menggunakan *software* dilakukan dengan bantuan *software* FEA, di mana data yang dimasukkan disesuaikan dengan kondisi asli untuk memperoleh nilai deformasi melalui pendekatan numerik.



Gambar 8. Hasil Perhitungan Menggunakan *Software Abaqus*

Gambar 8 merupakan hasil simulasi perhitungan menggunakan *software Abaqus*. Perhitungan deformasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga (FEA). Data masukan

disesuaikan dengan kondisi aktual model untuk memperoleh hasil yang merepresentasikan perilaku struktur secara lebih realistis. Hasil simulasi numerik menunjukkan pola deformasi yang divisualisasikan pada Gambar 8, dengan nilai defleksi maksimum sebesar 0,00188 m

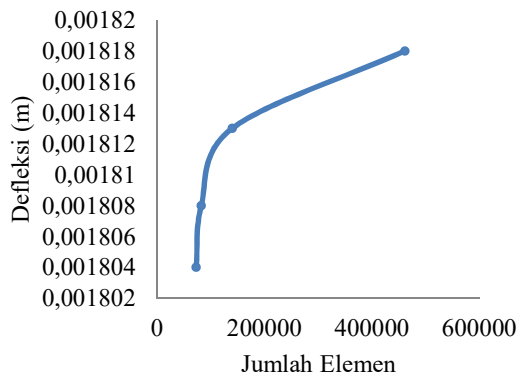
Tabel 4. Hasil Validasi.

Hasil Analitik	Hasil Numerik	Error
0.001744 m	0,001818 m	3,65%

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil simulasi, dilakukan validasi terhadap hasil analitik. Berdasarkan Tabel 4, hasil perhitungan analitik memberikan nilai defleksi sebesar 0,001744 m, sedangkan hasil numerik dari *software* menunjukkan nilai sebesar 0,001818 m. Selisih antara keduanya menghasilkan nilai *error* sebesar 3,65%, yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk analisis teknik, sehingga dapat disimpulkan bahwa model numerik cukup valid untuk mewakili kondisi struktur yang dianalisis.

Validasi Model dalam penelitian ini dilakukan melalui uji konvergensi mesh. Tujuan utamanya adalah untuk menentukan ukuran mesh yang paling sesuai bagi pemodelan struktur kapal dalam analisis Metode Elemen Hingga (FEM). Uji ini bertujuan memastikan bahwa hasil analisis FEM bersifat akurat dan dapat diandalkan.

Proses uji dilakukan dengan mengecilkan ukuran mesh secara bertahap dari ukuran awal hingga ditemukan ukuran yang optimal. Ukuran mesh yang tepat akan menghasilkan solusi FEM yang stabil dan konvergen, artinya perubahan ukuran mesh tidak memberikan dampak signifikan terhadap hasil akhir. Ini merupakan langkah penting dalam memastikan validitas hasil analisis struktur.



Gambar 9. Grafik *Grid independence*

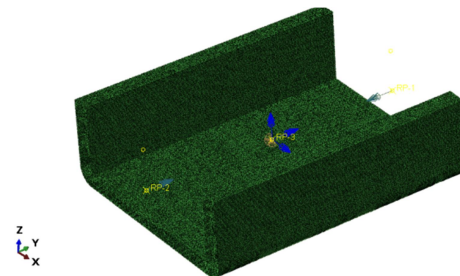
Gambar 9 menunjukkan hasil studi *Grid Independence* berdasarkan nilai defleksi yang diperoleh dari variasi jumlah elemen pada model. Dari grafik terlihat bahwa seiring bertambahnya jumlah elemen, nilai defleksi mengalami perubahan yang semakin kecil hingga mendekati nilai konvergen. Nilai defleksi tertinggi tercatat sebesar 0,001818 m pada jumlah elemen sekitar 461.173 elemen.

Hasil ini menunjukkan bahwa model telah mencapai kondisi, ditandai dengan perubahan defleksi yang sangat kecil meskipun jumlah elemen ditambah secara signifikan. Berdasarkan teori, nilai error *mesh* konvergen yang berada di kisaran 0.28% umumnya dianggap memadai untuk aplikasi teknik.

Pada analisis ini menggunakan model dengan ukuran mesh 100 mm. Ukuran mesh tersebut dipilih karena mesh ini memiliki hasil simulasi yang cukup akurat dibandingkan dengan ukuran mesh lainnya dan memiliki waktu running yang tidak terlalu lama.

3.3. Peletakan Momen Puntir Pada Model

Nilai momen akan diletakkan pada *frame* 30 dan *frame* 78 pada bagian inner bottom kapal dengan . Peletakan momen dilakukan agar momen yang diterapkan merata pada seluruh panjang kapal.



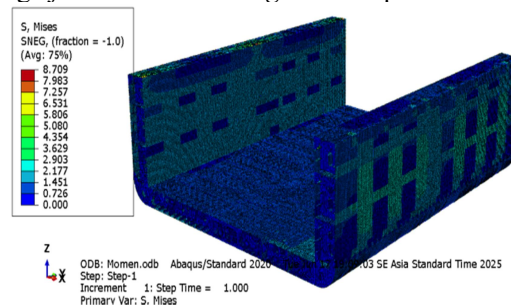
Gambar 10. Peletakan Pembebanan pada *Cargo hold* Kapal

Gambar 10 memperlihatkan proses peletakan momen dibantu oleh titik referensi atau *Reference Point* (RP) yang diletakan pada *Neutral Axis cargo hold* sehingga pembebanan dapat dilakukan dengan merata. Nilai momen yang diterapkan didapatkan melalui persamaan momen maksimal sesuai standar kelas adapun hasil dari perhitungannya adalah:

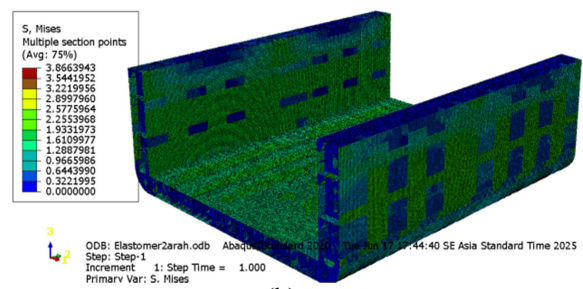
$$Mwt \max (kNm) = 5736 \text{ kNm. (5)}$$

3.4. Hasil Analisis Konstruksi *Cargo hold*

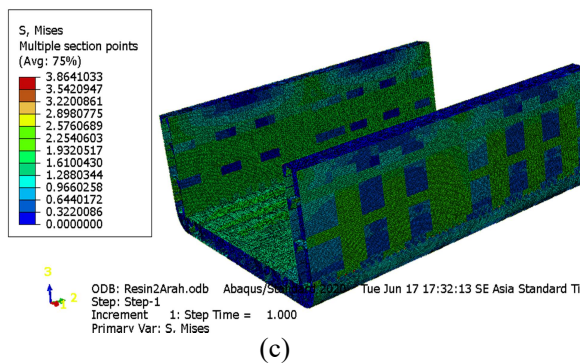
Hasil dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan nilai tegangan dan deformasi pelat konvensional dengan *Sandwich Plate System*. Gambar 11 memperlihatkan hasil analisis distribusi tegangan maksimum (*von Mises*) pada tiga jenis konstruksi *cargo hold* kapal.



(a)



(b)



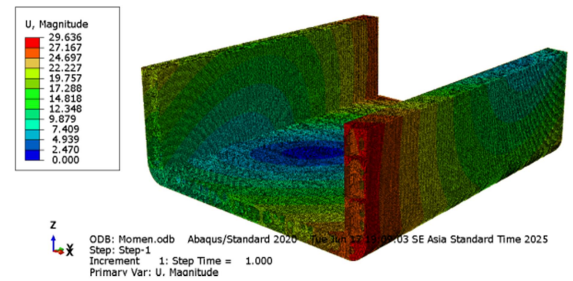
(c)

Gambar 11. (a) Hasil Analisis Tegangan Maksimal pada (a) Konstruksi Konvensional, (b) Konstruksi SPS Berbahan Inti Elastomer, (C) Konstruksi SPS Berbahan Inti Synthetic Resin

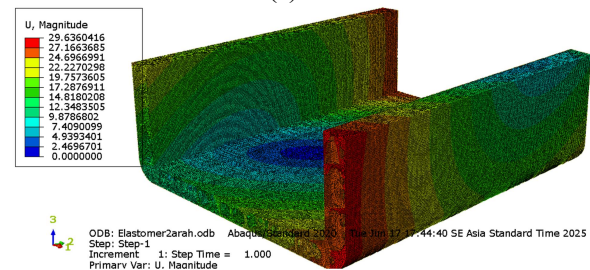
Dapat dilihat pada Gambar 11 distribusi tegangan *von Mises* hasil simulasi memiliki rentang nilai tegangan yang divisualisasikan melalui gradasi warna dengan keterangan tabel warna untuk memberi keterangan nilai tegangan yang terjadi pada bagian tertentu. Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur ditandai dengan warna merah, sedangkan tegangan minimum ditandai dengan warna biru.

Pada konstruksi konvensional, terlihat bahwa tegangan maksimum mencapai nilai tertinggi, yaitu 8,7 MPa, yang tersebar merata di beberapa bagian pelat dan sambungan struktur. Sebaliknya, pada model SPS dengan inti elastomer, tegangan maksimum turun secara signifikan menjadi 3,87 MPa. Penyebaran tegangan tampak lebih halus dan terlokalisasi di beberapa titik kritis, yang menandakan adanya distribusi beban yang lebih efisien berkat sifat elastomerik material inti. Sementara itu, hasil pada model SPS dengan inti synthetic resin menunjukkan nilai tegangan maksimum yang hampir identik dengan elastomer, yaitu sekitar 3,86 MPa. Meskipun demikian, pola penyebaran tegangannya cenderung lebih terkonsentrasi di bagian tengah, terutama pada *frame-frame* utama, seperti terlihat pada analisis numerik sebelumnya.

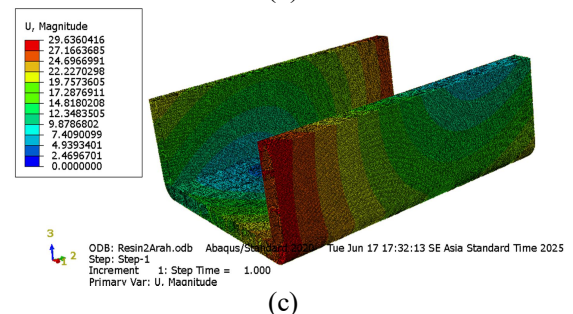
Sementara itu Gambar 12 memperlihatkan hasil analisis defleksi (*Displacement*) pada tiga jenis konstruksi *cargo hold* kapal.



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Hasil Analisis Defleksi pada (a) Konstruksi Konvensional, (b) Konstruksi SPS Berbahan Inti Elastomer, (c) Konstruksi SPS Berbahan Inti Synthetic Resin

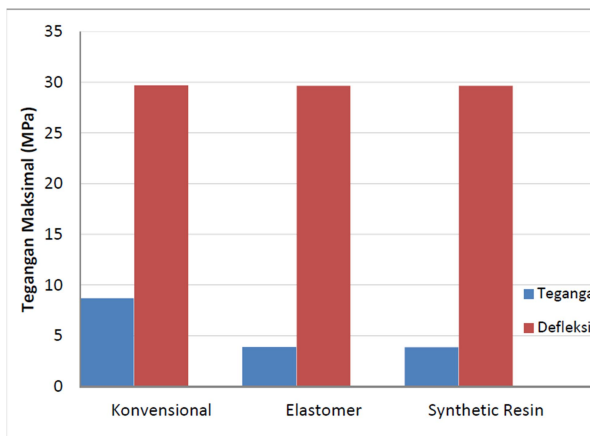
Dapat dilihat pada Gambar 12 distribusi hasil analisis defleksi memiliki rentang nilai defleksi yang divisualisasikan melalui gradasi warna dengan keterangan tabel warna untuk memberi keterangan nilai defleksi yang terjadi pada bagian tertentu. Defleksi maksimum yang terjadi pada struktur ditandai dengan warna merah, sedangkan defleksi minimum ditandai dengan warna biru.

Hasil analisis defleksi menunjukkan bahwa seluruh model konstruksi mengalami deformasi maksimum pada bagian ujung dan tengah struktur *cargo hold*. Pada konstruksi konvensional, nilai defleksi maksimum tercatat sebesar 29,7 mm. Penyebaran deformasi tampak cukup luas dan merata di sepanjang pelat struktur.

Sebaliknya, model konstruksi dengan penerapan SPS menunjukkan performa yang lebih baik dalam mengendalikan deformasi. Pada model dengan inti elastomer, defleksi maksimum menurun menjadi 29,64 mm. Nilai ini sedikit

lebih rendah dibandingkan dengan konstruksi konvensional. Selain itu, penyebaran deformasi tampak lebih terfokus dan tidak merata, menandakan distribusi beban yang lebih efisien. Hal ini disebabkan oleh karakteristik elastomer yang lentur dan mampu menyerap energi torsi secara efektif.

Sementara itu, model dengan inti synthetic resin menunjukkan nilai defleksi yang hampir identik dengan elastomer, yaitu 29,64 mm. Meskipun demikian, pola penyebaran deformasi pada model ini cenderung lebih terkonsentrasi di bagian tengah struktur, khususnya pada *frame-frame* utama. Distribusi ini mencerminkan karakteristik resin yang memiliki kekakuan lebih tinggi dibandingkan elastomer, sehingga gaya puntir terserap secara lokal.



Gambar 13. Grafik Perbandingan Tegangan dan Defleksi pada Variasi Konstruksi *Cargo Hold*

Gambar 13 merupakan perbandingan hasil analisis kekuatan torsional. Hasil menunjukkan bahwa material konvensional memiliki tegangan maksimum tertinggi sebesar 8,7 MPa, sedangkan elastomer dan synthetic resin menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah, yaitu sekitar 3,87 MPa. Defleksi yang dihasilkan oleh ketiga material hampir sama, berkisar antara 29,64 hingga 29,7 mm.

Grafik perbandingan memperjelas bahwa konstruksi konvensional menghasilkan tegangan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dua variasi material lain, sementara defleksi tetap berada dalam rentang yang sama. Hal ini memperkuat potensi penggunaan material komposit sebagai alternatif yang lebih ringan dan efisien dalam desain struktur kapal tanpa mengorbankan kekuatan maupun kestabilan bentuk.

3.5. Safety factor

Safety Factor merupakan rasio yang menggambarkan kemampuan suatu material teknik dalam menahan beban eksternal, baik beban tekan maupun tarik. Sebelum menentukan nilai *Safety Factor*, Pengecekan dilakukan dengan cara membandingkan tegangan maksimal dengan tegangan ijin. *Safety Factor* didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\text{Safety Factor (SF)} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (5)$$

Perhitungan *Safety Factor* dapat dicari sesuai dengan ketentuan BKI Vol. II Bagian 2 yang mana nilai tersebut didapatkan dari tegangan ijin dibandingkan tegangan maks. Suatu struktur dapat dikatakan aman, apabila nilai $Sf > 1$.

Tabel 5 . Perbandingan Hasil Analisis Variasi Konstruksi *Cargo Hold*

Jenis Konstruksi	σ maks (MPa)	Σ ijin (MPa)	Status
Konvensional	8.7	106	Memenuhi
Elastomer	3.87	106	Memenuhi
Synthetic Resin	3.86	106	Memenuhi

Tabel 5 menyajikan hasil stress maksimal dengan perbandingan tegangan ijin untuk berbagai jenis konstruksi *cargo hold*, yaitu konstruksi konvensional, elastomer, dan *synthetic resin*. Apabila dibandingkan dengan tegangan ijin maka dapat disimpulkan bahwa material Konvensional dan SPS aman digunakan sesuai ketentuan yang berlaku.

Berdasarkan standar BKI Volume II Section 2, tegangan ijin maksimum material ditetapkan sebesar 106 MPa. Dari hasil analisis tabel yang disajikan, dapat disimpulkan bahwa model kapal kontainer yang telah melakukan modifikasi pada struktur pelatnya telah memenuhi seluruh persyaratan regulasi klasifikasi sesuai ketentuan BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) yang berlaku.

4. KESIMPULAN

Hasil perhitungan dan analisis struktur *cargo hold* kapal kontainer menggunakan metode elemen hingga menunjukkan beberapa temuan penting. Konfigurasi ketebalan *Sandwich Plate System* (SPS) 5-15-5 mm telah memenuhi persyaratan rules LR 2015. Tegangan maksimum tercatat sebesar 8,6 MPa pada ujung kapal untuk konstruksi plat baja konvensional dengan defleksi

sebesar 29,7 mm, sedangkan penggunaan SPS dengan inti Elastomer dan Synthetic Resin menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah, masing-masing 3,87 MPa dan 3,87 MPa dengan defleksi sebesar 29,64 mm dan 29,64 mm. Meskipun menunjukkan nilai tegangan yang lebih besar, seluruh konfigurasi material tersebut tetap memenuhi kriteria kekuatan berdasarkan standar BKI.

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa modifikasi struktur dengan menerapkan SPS pada kapal kontainer tetap memenuhi semua persyaratan klasifikasi BKI. Penggunaan material komposit SPS baik dengan inti Elastomer maupun Synthetic Resin terbukti layak sebagai alternatif pengganti pelat baja konvensional, sekaligus mempertahankan integritas struktural sesuai regulasi yang berlaku. Temuan ini membuka peluang pemanfaatan material inovatif dalam konstruksi kapal tanpa mengorbankan aspek keselamatan dan kekuatan struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Zenkert, "AN INTRODUCTION TO SANDWICH STRUCTURES," 1995.
- [2] J. Cheloni, M. Silveira, E. S. Najar Lopes, and L. Silva, "Fatigue and Failure Analysis of Sandwich Composites using Two Types of Cross-Ply Glass Fibers Laminates and Epoxy Resin," *J. Res. Updat. Polym. Sci.*, vol. 11, pp. 36–44, 2022, doi: 10.6000/1929-5995.2022.11.06.
- [3] R. F. Gibson, "A mechanics of materials/fracture mechanics analysis of core shear failure in foam core composite sandwich beams," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 13, no. 1, pp. 83–95, 2011, doi: 10.1177/1099636209359843.
- [4] T. N. Bitzer, *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Springer Netherlands, 1997.
- [5] "Sandwich Plate System (SPS) for new ships - A technical update," *Nav. Archit.*, no. JUL./AUG., pp. 9 – 10, 2004, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33644995093&partnerID=40&md5=c76dc7a539190e0047cd0b9e64598f5c>.
- [6] J. Y. R. Liew, M.-X. Xiong, and B.-L. Lai, *Design of Steel-Concrete Composite Structures Using High-Strength Materials*. 2021.
- [7] N. Momčilović and M. Motok, "Estimation of ship lightweight reduction by means of application of sandwich plate system," *FME Trans.*, vol. 37, no. 3, pp. 123–128, 2009.
- [8] E. Altunsaray and N. Gökdeniz, "A Practical Approach to the Design of Long Sandwich Plates," vol. 226, no. 2, pp. 80–90, 2002, doi: 10.54926/jnamt.2025.249.
- [9] Llyod's Register, "Provisional rules for the application of sandwich panel construction to ship structure," 2015.
- [10] H. Isworo and P. R. Ansyah, "Buku Ajar Metode Elemen Hingga," p. 68, 2018.
- [11] Ramakrishnan and S. Kumar, "Applications of Sandwich Plate System for Ship Structures," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, pp. 83–90, 2016.
- [12] M. Zare and R. Sedaghati, "Topology optimization of adaptive sandwich plates with magnetorheological core layer for improved vibration attenuation," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 26, pp. 1312–1340, 2024, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:72238954>.
- [13] J. Abedin, F. Franklin, and S. M. I. Mahmud, "Validation of the Hull Girder Deflection of a Multipurpose Cargo Ship," *ASEAN Eng. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 183–193, 2024, doi: 10.11113/aej.V14.21054.
- [14] H. Ju, "Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Loads," *J. Korea Concr. Inst.*, vol. 35, no. 6, pp. 611 – 623, 2023, doi: 10.4334/JKCI.2023.35.6.611.
- [15] J. Nie, L. Tang, and C. S. Cai, "Performance of steel-concrete composite beams under combined bending and torsion," *J. Struct. Eng.*, vol. 135, no. 9, pp. 1048 – 1057, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000042.
- [16] J. Cui, D. Wang, and N. Ma, "Container ship ultimate strength subject to combined bending and torsional moments considering corrosion effects," in *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2015, vol. 2015-Janua, pp. 1129 – 1134, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84944674240&partnerID=40&md5=25b22fc8de6da1b52066ab2f98fc30f2>.
- [17] Q. Wang, C. Wang, J. Wu, and D. Wang, "Investigations on the torsional failure characteristics of the global hull girder with large deck openings," *Ocean Eng.*,

- vol. 198, p. 107007, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107007.
- [18] C. Wang, J. Wu, and D. Wang, "Design similar scale model of a 10,000 TEU container ship through combined ultimate longitudinal bending and torsion analysis," *Appl. Ocean Res.*, vol. 88, pp. 1–14, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.016>.
- [19] H. Wu, W. Wu, J. Gan, and H. Sun, "Ultimate strength analysis of a river-sea ship under combined action of torsion and bending," in *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2013, vol. 2 B, doi: 10.1115/OMAE2013-11007.
- [20] K. Iijima, T. Shigemi, R. Miyake, and A. Kumano, "A practical method for torsional strength assessment of container ship structures," *Mar. Struct.*, vol. 17, no. 5, pp. 355 – 384, 2004, doi: 10.1016/j.marstruc.2004.08.011.
- [21] N. Baroiu, E. F. Beznea, G. Coman, and I. Chirica, "Static and thermal behaviour of ship structure sandwich panels," *Therm. Sci.*, vol. 25, no. 2 Part A, pp. 1109–1121, 2021, doi: 10.2298/TSCI190531463B.
- [22] Z. Huang, H. Peng, X. Wang, and F. Chu, "Modeling and Vibration Control of Sandwich Composite Plates," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/ma16030896.
- [23] A. Zubaydi, A. Budipriyanto, E. Utomo, and S. H. Sujatanti, "Development of sandwich core material for deck structure," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 11, pp. 2551 – 2560, 2018, doi: 10.12962/j23546026.y2017i6.3237.
- [24] D. Elmalich and O. Rabinovitch, "Twist in soft-core sandwich plates," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 577–613, 2014, doi: 10.1177/1099636214547490.
- [25] S. IRFAN and F. SIDDIQUI, "A review of recent advancements in finite element formulation for sandwich plates," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 32, no. 4, pp. 785–798, 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.011.
- [26] N. Ahn and K. Lee, "A study on transverse vibration characteristics of a sandwich plate with asymmetrical faces," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 40, no. 4, pp. 501 – 515, 2011, doi: 10.12989/sem.2011.40.4.501.
- [27] 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," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1423, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/1423/1/012034.
- [28] C. Labriola and V. Tagarielli, "ARPRO®: A new structural core material for the yacht industry," in *18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, CSYS*, 2007, pp. 129 – 136, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77950466488&partnerID=40&md5=f78272eb2f07a2b5adafd9d0bf14d0af>.
- [29] A. Uzal, F. O. Sonmez, F. E. Oz, K. Cinar, and N. Ersoy, "A composite sandwich plate with a novel core design," *Compos. Struct.*, vol. 193, pp. 198–211, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.047.
- [30] P. Nampally, A. T. Karttunen, and J. N. Reddy, "Nonlinear finite element analysis of lattice core sandwich plates," *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 121, 2020, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103423.
- [31] A. Ismail, A. Zubaydi, B. Piscesa, T. Tuswan, and R. C. Ariesta, "STUDY of SANDWICH PANEL APPLICATION on SIDE HULL of CRUDE OIL TANKER," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 19, no. 4, pp. 1090–1098, 2021, doi: 10.5937/jaes0-30373.
- [32] Yuwantoro, "Analisa Kekuatan Penerapan Sandwich Plate System (SPS) Pada Tank Deck Kapal Landing Ship Tank (LST) 7000 DWT," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, pp. 420–429, 2019.
- [33] B. K. Indonesia, "RULES FOR HULL," *Rules Hull 2019 ed.*, vol. II, p. Page 20–7, 2019.