

# Analisis Kekuatan Pelat Sandwich pada Geladak dan Sisi dengan Metode Elemen Hingga

Ervan Panangian, Achmad Zubaydi, Abdi Ismail, Rizky Chandra Ariesta, dan Tuswan  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail:* zubaydi@na.its.ac.id

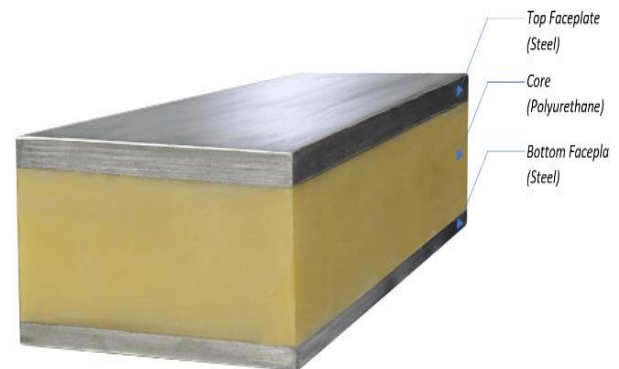
**Abstrak**—Syarat utama sebuah material agar dapat dianggap layak untuk menjadi bahan konstruksi kapal adalah kuat dan ringan sehingga kapal dapat beroperasi dengan baik dan mampu mengangkut payload yang optimal. Beberapa literatur telah menunjukkan bahwa penerapan pelat sandwich mampu mengurangi berat kapal dengan estimasi kasar sekitar 5-15%. Pelat sandwich ini pun sudah digunakan secara komersial pada dunia industri perkapalan dan sudah distandardisasi oleh beberapa biro klasifikasi IACS seperti Llyod Register (LR), Bureau Veritas (BV), dan Det Norske Veritas (DNV). Pelat sandwich yang paling umum digunakan adalah pelat sandwich dengan core polyurethane elastomer. Konfigurasi ini telah dipatenkan dengan nama sandwich plate system (SPS). Namun, bahan polyurethane pada SPS tersebut sulit dicari khususnya di dalam negeri. Polyurethane yang umum dijumpai dalam negeri adalah polyurethane elastomer tipe casting. Polyurethane jenis ini relatif murah dan mudah diproduksi di dalam negeri. Pelat sandwich dengan material tersebut akan diteliti secara numerik menggunakan metode elemen hingga. Penelitian dilakukan dengan membandingkan tegangan maksimum pada konfigurasi baja konvensional dengan konfigurasi sandwich dengan variasi jarak penegar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari perbandingan nilai kekuatan antara konfigurasi baja konvensional dengan konfigurasi pelat sandwich. Penelitian menunjukkan bahwa tegangan pada struktur pelat sandwich memenuhi tegangan izin dan tegangan maksimum pada model sandwich adalah 79.849 MPa, dimana pengurangan tegangan yang terjadi adalah sebesar 30.522 MPa atau sekitar 27.654%.

**Kata Kunci**—Konstruksi Kapal, Metode Elemen Hingga, Pelat Sandwich, Tegangan, Tegangan Izin.

## I. PENDAHULUAN

DALAM sejarah, banyak material yang telah digunakan dalam proses membangun kapal, mulai dari bahan-bahan konvensional seperti kayu, semen, besi cor, hingga bahan yang umum digunakan sekarang seperti baja, aluminium, dan *carbon fibre*. Seiring perkembangan teknologi, material kapal dituntut untuk memiliki kekuatan yang baik namun dengan massa yang seringan mungkin. Secara umum, tentu hal tersebut sulit diraih karena material yang kuat cenderung berat dan material yang ringan cenderung memiliki nilai kekuatan yang kecil. Pelat *sandwich* (atau juga biasa disebut *sandwich panel*) adalah salah satu solusi dari permasalahan yang telah disebutkan sebelumnya.

Pelat *sandwich* merupakan sebuah konfigurasi gabungan dua material atau lebih yang terdiri dari lapisan kulit muka (*faceplate*) dan lapisan inti (*core*). Konfigurasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1, dimana *core* diapit oleh dua lapisan *faceplate*. Lapisan *faceplate* dibuat dari material dengan kekuatan dan kekakuan yang tinggi, sedangkan lapisan *core* dibuat dari material dengan kekuatan, kekakuan, dan kerapatan yang lebih rendah [3]. Tiga lapisan tersebut akan



Gambar 1. Konfigurasi Tipikal Pelat *Sandwich*.

Tabel 1.

Ukuran utama kapal <i>crude oil tanker</i> 17500 DWT		
Deskripsi	Ukuran	Satuan
Displacement (t)	17500	ton
Length Overall (LOA)	157.50	m
Length Perpendicular (LPP)	149.50	m
Breadth Moulded (B)	27.70	m
Depth Moulded	12.00	m
Draft (T)	7.00	m
Service Speed (Vs)	13	knots
Complement	28	persons

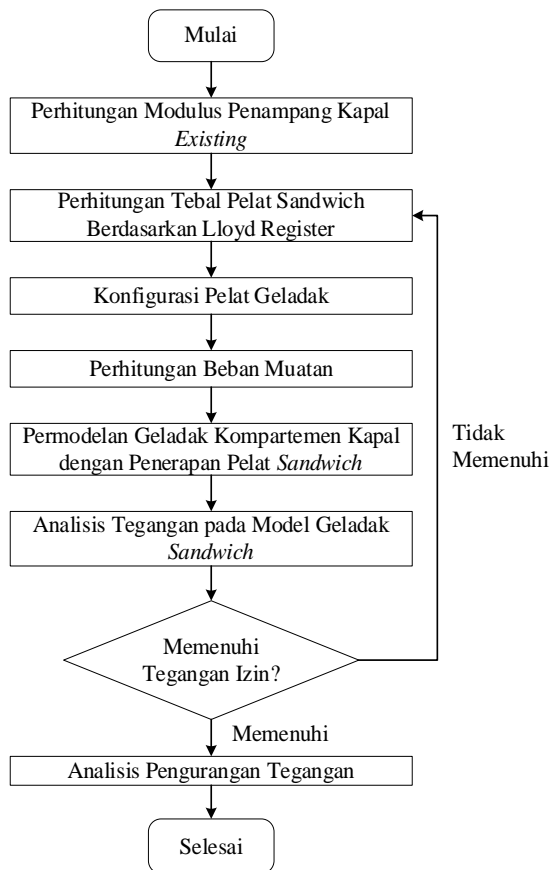
membentuk satu kesatuan pelat *sandwich* yang memiliki nilai kekuatan dan kekakuan yang cukup dengan berat yang efisien.

Keuntungan utama dari penerapan pelat *sandwich* dibandingkan dengan menggunakan pelat baja konvensional adalah sebagai berikut: (1) mengurangi kebutuhan penegar, (2) manufaktur struktur lebih sederhana dan tidak memakan waktu, (3) rasio kekuatan dan berat yang baik (4), menyederhanakan proses konstruksi, (5) dapat berintegrasi dengan fungsi yang berbeda, (6) meningkatkan nilai *crashworthiness* pada struktur, dan (7) mengurangi berat struktur [1]. Pengurangan berat pada kapal tentunya sangat menguntungkan bagi pemilik atau penyewa kapal dimana pengurangan berat akibat penerapan pelat *sandwich* bervariasi antara 5-8% [2]. Pengurangan berat dan pengurangan jumlah penegar tersebut dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan payload kapal.

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Konstruksi Kapal

Secara umum, konstruksi kapal terbagi atas tiga jenis yaitu konstruksi melintang, konstruksi memanjang, dan konstruksi campuran. Konstruksi melintang merupakan konstruksi dimana penguat utama kapal adalah penguat melintang seperti frame, web frame, deck beam, dan strong beam.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

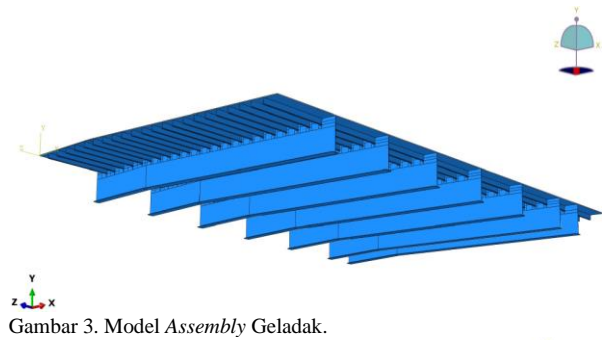
Konstruksi jenis ini tidak memiliki penguat memanjang sehingga konstruksi jenis ini hanya cocok digunakan pada kapal yang berukuran pendek (dibawah 90 meter). Konstruksi melintang merupakan konstruksi yang menggunakan konstruksi memanjang di bagian lambung dan konstruksi melintang di bagian alas dan geladak. Konstruksi jenis ini tepat digunakan pada kapal dengan panjang kapal  $90 < x < 100$  meter. Konstruksi memanjang adalah konstruksi yang menggunakan penguat memanjang pada seluruh bagian kapal (kecuali kamar mesin) dimana konstruksi jenis ini digunakan pada kapal dengan panjang lebih dari 100 meter [3].

Pada penelitian ini, penerapan pelat sandwich dilakukan pada kapal crude oil tanker 17500 DWT sebagai objek yang akan diteliti. Kapal tersebut menggunakan sistem konstruksi memanjang sebagai penguatnya sehingga pengurangan jumlah penegar akan dilakukan pada pembujur geladak dan pembujur sisi.

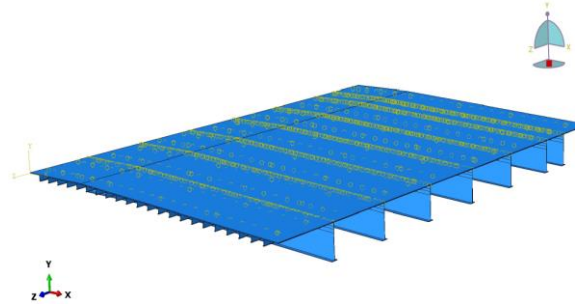
**B. Pelat Sandwich**

Pelat *sandwich* merupakan suatu konfigurasi pelat yang terdiri dari lapisan kulit muka (*faceplate*) dan lapisan inti (*core*). Lapisan *faceplate* dibuat dari material yang memiliki kekuatan dan kekakuan bahan yang tinggi. Sedangkan lapisan *core* dibuat dari material yang memiliki kekuatan, kekakuan, dan kerapatan bahan yang lebih rendah [4]. Gambar 1 merupakan contoh bentuk tipikal sebuah potongan pelat sandwich.

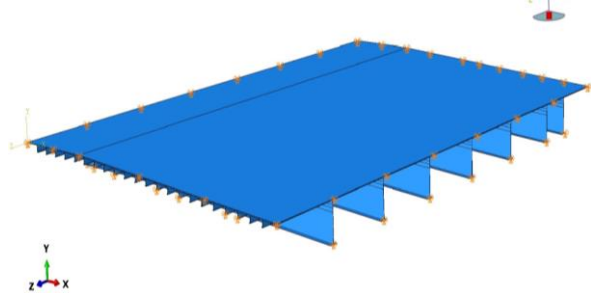
Secara sederhana, pelat *sandwich* adalah struktur pelat dengan permukaan kaku yang dipisahkan oleh inti yang berbahan ringan. Kombinasi dari kedua material ini akan memberikan rasio kekuatan dan kekakuan terhadap berat



Gambar 3. Model Assembly Geladak.



Gambar 4. Pengaturan tie constraint pada model.

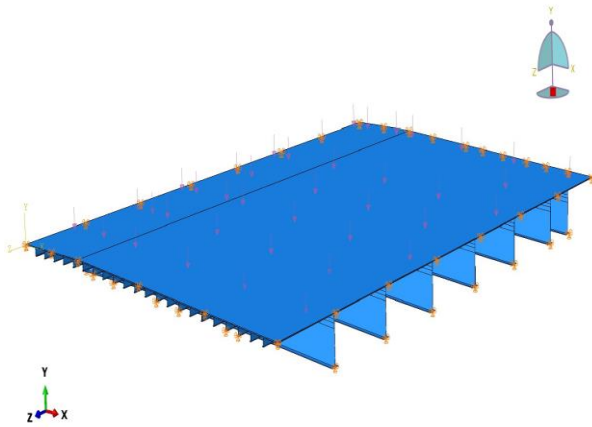


Gambar 5. Kondisi batas pada model geladak.

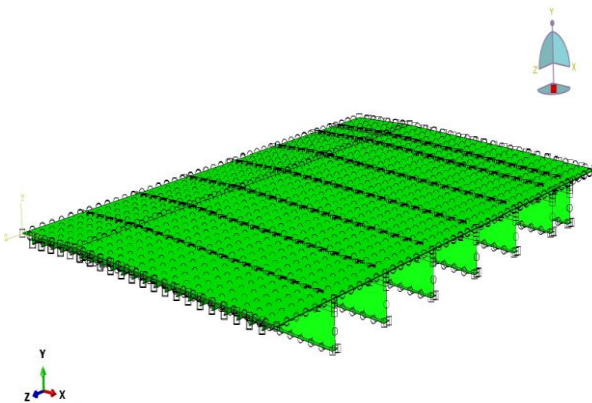
yang sangat efisien, hal ini disebut dengan efek *sandwich*. Pelat *sandwich* dapat dibuat dengan variasi lapisan material yang berbeda-beda. Namun, sistem pelat *sandwich* yang paling sering digunakan pada industri perkapalan adalah *sandwich plate system* (SPS), dimana material *faceplate* terbuat dari baja dan *core* terbuat dari material polyurethane elastomer. Akan tetapi, jenis polyurethane elastomer tipe *room temperature cured* yang digunakan pada SPS memiliki harga yang relatif mahal dan sulit didapatkan [5] sehingga diperlukan alternatif *core* material untuk menggantikan *core* tersebut.

Polyurethane yang banyak terdapat di dalam negeri adalah polyurethane elastomer tipe *casting*. Material ini memiliki harga yang relatif murah dan harganya masih dapat diturunkan dengan cara menambahkan polimer *glass fiber*. Tujuan penambahan polimer ini adalah untuk menciptakan material polyurethane elastomer yang lebih murah namun nilai kekuatannya tetap mencukupi. Tipe *glass fiber* yang digunakan adalah *glass fiber reinforced polymeric* (GFRP) dimana tipe ini adalah tipe *glass fiber* yang paling umum digunakan, termasuk pada industri perkapalan.

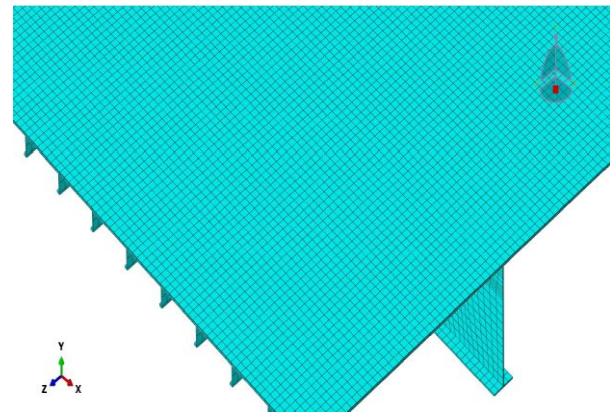
Penggantian pelat baja konvensional menjadi pelat *sandwich* tentunya memerlukan pertimbangan, termasuk pertimbangan tegangan izin. Analisa tegangan dilakukan menggunakan analisis metode elemen hingga, kemudian akan dilakukan perbandingan pengurangan berat antara penerapan pelat baja berpenegar dengan pelat *sandwich core* polyurethane elastomer tipe *casting* berpenguat *fiberglass*.



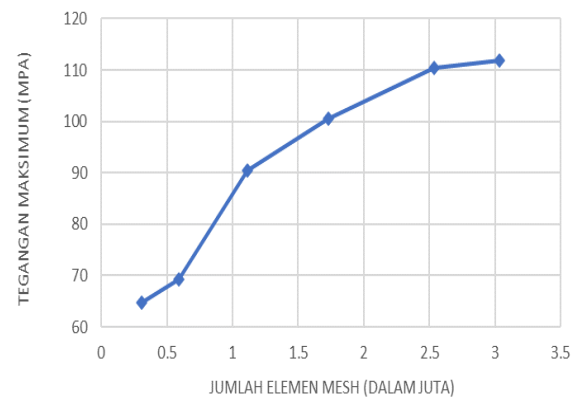
Gambar 6. Pembebanan pada model geladak.



Gambar 7. Hasil pengaturan *global seeds*.



Gambar 8. Hasil *mesh* pada model.



Gambar 9. Studi konvergensi pada model konvensional.

C. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan Teknik dan matematika fisik. Permasalahan teknik yang dapat diselesaikan menggunakan metode ini beberapa diantaranya adalah analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, perpindahan massa, dan potensial elektromagnetik. Analisis metode elemen hingga didasarkan pada representasi sistem struktur yang tersusun atas elemen-elemen kecil. Elemen-elemen ini membentuk sistem jaringan elemen melalui hubungan/sambungan di titik-titik nodal elemen.

*Finite element analysis* adalah analisis yang menggunakan metode elemen hingga sebagai basis perhitungannya. *Finite element analysis* dapat digunakan untuk menganalisa masalah struktural dan non-struktural. Contoh analisis struktural antara lain: (1)Analisa tegangan (*stress*) dan deformasi (*magnitude*); (2)*Buckling*; (3)Analisa getaran, dan contoh analisis non-struktural mencakup antara lain: (1)Perpindahan panas; (2)Aliran fluida; (3)Distribusi magnetik dan elektrik.

Selain metode elemen hingga, terdapat beberapa metode dalam melakukan analisa numerik seperti *finite difference method* (FDM), *finite volume method* (FVM), dan lain-lain. Setiap metode memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing sehingga perlu dikaji metode apa yang paling cocok untuk menyelesaikan suatu masalah. Dalam penelitian ini, analisa struktur dan tegangan seluruhnya menggunakan metode elemen hingga karena memiliki keuntungan sebagai berikut: (1)Lebih presisi dalam menganalisa bentuk-bentuk irregular; (2)Mudah dalam pembuatan analisa dengan kondisi beban umum; (3)Model dapat dianalisa sebagai material yang

berbeda-beda karena persamaan elemen dievaluasi secara individu; (4)Dapat dengan mudah dianalisa dengan bermacam-macam kondisi dan jumlah Batasan; (5)Ukuran elemen bervariasi sehingga memungkinkan untuk menggunakan elemen yang lebih kecil.

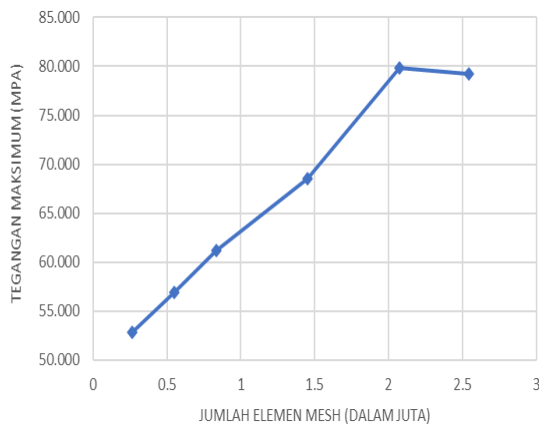
Namun, dalam melakukan analisis metode elemen hingga, perhitungan manual sangat sulit dilakukan untuk benda-benda yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan alat bantu berupa perangkat lunak dan dalam penelitian ini analisis elemen hingga dilakukan menggunakan *software* elemen hingga.

D. Pengembangan Pelat Sandwich

Seperti yang telah diketahui, pelat *sandwich* merupakan konfigurasi pelat yang sangat fleksibel karena dapat terdiri dari berbagai macam material sebagai bahan *faceplate* maupun *core*-nya. Konfigurasi pelat *sandwich* yang sudah dipatenkan bernama *sandwich plate system* (SPS) yang umum digunakan pada konstruksi kapal. SPS menggunakan baja sebagai bahan dasar *faceplate*-nya dan polyurethane sebagai bahan dasar *core*. [6].

Pelat *sandwich* khususnya SPS telah digunakan pada banyak hal di kehidupan sehari-hari. Namun, meskipun SPS telah umum digunakan pada cakupan industri yang luas seperti bangunan sipil, bangunan lepas pantai, dan militer [7], aplikasi pelat *sandwich* pada bidang perkapalan lebih dominan digunakan sebagai metode dalam reparasi kapal. Metode ini digunakan sebagai salah satu alternatif dari proses reparasi tradisional dengan metode "*crop and replace*" [7].

Penelitian penerapan pelat *sandwich* pada pelat alas dalam telah dilakukan oleh Achmad Baidowi dan kawan-kawan pada tahun 2017. Penelitian tersebut menggunakan SPS



Gambar 10. Studi konvergensi pada model *sandwich*.

Tabel 2.  
Hasil analisis tegangan pada model

Model	Tegangan Maksimum (MPa)	Pengurangan Tegangan (MPa)	Presentase
Konvensional	110.371	-	-
<i>Sandwich</i>	79.849	30.522	27.654%

sebagai pengganti pelat baja dan menghilangkan seluruh penegar alas dalam (*inner bottom longitudinal*). Kemudian dilakukan analisis numerik pada model alas dalam konvensional dan pada model alas dalam dengan SPS. Dari hasil simulasi didapatkan besar tegangan maksimal untuk material baja AH36 sebesar 226 MPa dengan menggunakan penegar, sedangkan konstruksi dengan material SPS tegangan maksimal yang dihasilkan sebesar 221 MPa tanpa penggunaan penegar, dengan deformasi maksimal untuk AH36 dan SPS yaitu 77 mm yang terjadi pada bagian tengah blok konstruksi *inner bottom*. Dengan hilangnya penegar berat konstruksi berkurang sebesar 13,05% dari penggunaan material baja AH36 sehingga memberikan peningkatan payload sebesar 13,05%. Simulasi penelitian dilakukan pada *Bulk Carrier* [8].

Penelitian penerapan pelat *sandwich* pada aplikasi geladak kapal juga telah dilakukan oleh Achmad Zubaydi dan kawan-kawan pada tahun 2017. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap konfigurasi *sandwich* dengan empat jenis *core* berbahan sintetik resin dan talc dengan variasi komposisi talc yang berbeda-beda yaitu 10%, 20%, 30%, dan 40%. Pengujian laboratorium dilakukan pada *core* menggunakan standar LR dan DNV. Aplikasi pelat tersebut dilakukan pada geladak kendaraan pada kapal Ro-Ro. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga untuk mencari nilai kekuatan yang terbaik dari keempat jenis variasi tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *core* dengan komposisi talc 40% merupakan variasi terbaik dibandingkan tiga variasi lainnya [1].

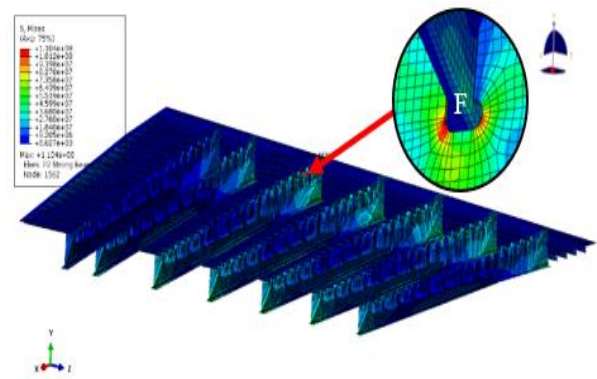
### III. METODOLOGI

#### A. Diagram Alir

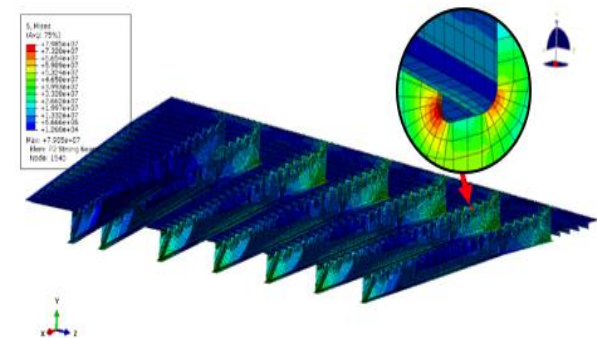
Penelitian dilakukan berdasarkan diagram alir yang dapat dilihat pada gambar 2.

#### B. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini adalah data



Gambar 11. Konsentrasi tegangan maksimum pada model konvensional.



Gambar 12. Konsentrasi tegangan maksimum pada model *sandwich*.

berupa ukuran utama kapal *crude oil tanker 17500 DWT* yang dapat dilihat pada tabel 1. Data lain yang diperoleh adalah berupa gambar *midship section* seperti pada gambar. Pada gambar tersebut terdapat ukuran-ukuran pada kapal yang diperlukan untuk melakukan perhitungan modulus, perhitungan ketebalan, dan permodelan geladak.

#### C. Perhitungan Modulus

Perhitungan modulus perlu dilakukan karena nilai modulus kapal diperlukan dalam perhitungan ketebalan *faceplate* dan *core*. Dalam menghitung modulus penampang, diperlukan data berupa lebar dan tinggi tiap bagian pada kapal sehingga diperoleh nilai luasan totalnya ( $A_{total}$ ) tiap bagiannya, lalu nilai momen luas dapat diperoleh dengan menggunakan rumus (1).

$$Momen\ Luas = A_{total} \times Z \tag{1}$$

Kemudian momen luasan tersebut akan dikalikan dengan nilai Z untuk memperoleh nilai momen inersia. Lalu dicari nilai inersia pada sumbu x ( $I_x$ ) dan inersia sumbu y ( $I_y$ ) dengan menggunakan rumus (2) dan rumus (3).

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \tag{2}$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 \tag{3}$$

kemudian diperoleh nilai momen inersia individu  $I_o$  dengan menggunakan rumus (4).

$$I_o = I_x \cos^2 \alpha + I_y \sin^2 \alpha \tag{4}$$

Penjumlahan total dari nilai luasan diberi notasi  $S_1$ , penjumlahan momen luasan diberi notasi  $S_2$ , penjumlahan momen inersia diberi notasi  $S_3$ , dan penjumlahan dari momen

inersia individu diberi notasi  $S_4$ . Kemudian dapat diperoleh nilai titik berat terhadap alas ( $Z_1$ ) dan titik berat terhadap geladak ( $Z_2$ ) dengan menggunakan rumus.

$$Z_1 = \frac{\Sigma z_2}{\Sigma_1} \quad (5)$$

$$Z_2 = H - Z_1 \quad (6)$$

Kemudian dapat diperoleh nilai modulus penampang terhadap alas ( $W_{\text{alas}}$ ) dan modulus penampang terhadap geladak ( $W_{\text{geladak}}$ ) dengan menggunakan rumus (7) dan rumus (8).

$$W_{\text{alas}} = \frac{I_{NA}}{Z_1} \quad (7)$$

$$W_{\text{geladak}} = \frac{I_{NA}}{Z_2} \quad (8)$$

dimana nilai  $I_{NA}$  dapat dihitung menggunakan rumus (9).

$$I_{NA} = I_{xx} - (Z_1)^2 \cdot \Sigma_1 \quad (9)$$

dan nilai  $I_{xx}$  diperoleh menggunakan rumus (10)

$$I_{xx} = \Sigma_3 + \Sigma_4 \quad (10)$$

Menggunakan persamaan yang telah dijelaskan tersebut, maka nilai dari modulus penampang kapal existing adalah sebesar **18808332.18 cm<sup>3</sup>**.

#### D. Perhitungan Ketebalan Pelat Sandwich

Pehitungan *faceplate* dan *core* pada konfigurasi pelat sandwich menggunakan standard Llyod Register yang terdapat pada *Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure* tahun 2019. Syarat ketebalan pada *faceplate* dan *core* berpatokan pada nilai *strength index* (R) dimana nilai R harus kurang dari 1 [9]. Perhitungan nilai *strength index* (R) dilakukan sesuai dengan rumus (11)

$$R = 0,01A_R \left[ 0,1 \frac{b^2}{d(t_1 + t_2)} + 11,7 \left( \frac{bt_c}{d^2} \right)^{1,3} \right] kP_{eq,R} \quad (11)$$

Nilai *strength index* untuk konfigurasi *sandwich* dengan ketebalan *faceplate* 4 mm dan *core* 20 mm adalah 0,743. Nilai R tersebut kurang dari 1 maka konfigurasi dinyatakan **memenuhi** syarat.

#### E. Perhitungan Pembebanan

Perhitungan pembebanan pada geladak menggunakan *rules* Bureau Veritas (BV). Hal ini disebabkan karena konstruksi kapal yang dijadikan model telah dikelaskan oleh BV. Pembebanan geladak pada BV dibagi menjadi dua yaitu *still water pressure* dan *green sea loads* dimana dua nilai pembebanan ini harus dihitung dan diambil nilai yang tertinggi. Beban *still water pressure* dihitung menggunakan rumus (11)

$$P_s = 10 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \quad (12)$$

Sedangkan pembebanan akibat *green sea loads* dihitung menggunakan rumus (12) [10]

$$P_w = 17,5 \cdot n \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \quad (13)$$

Hasil perhitungan dari kedua rumus tersebut adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} P_s &= 10 \text{ kN/m}^2 \\ P_w &= 17.5 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Oleh karena itu, nilai pembebanan yang digunakan pada penelitian ini adalah **17.5 kN/m<sup>2</sup>**.

#### F. Permodelan

Pada model struktur geladak, permodelan dilakukan dengan cara memodelkan bagian-bagian geladak menggunakan *software* 3d modelling. Bagian-bagian yang dimodelkan adalah pelat geladak, pembujur geladak, dan balok geladak.

Kemudian, setelah seluruh bagian telah dimodelkan maka *assembly* geladak dapat dilakukan. Gambar adalah model *assembly* geladak yang telah dibuat. Kemudian, setelah model telah dibuat perlu dilakukan pengaturan *constraint* pada model tersebut. *Tie constraint* mendefinisikan permukaan benda menjadi dua jenis, yaitu *master* dan *slave*. Pendefinisian *tie constraint* akan membuat seluruh *nodes* pada permukaan *slaves* tidak dapat menembus *nodes* daripada permukaan *master*. Permukaan dengan luas area yang lebih besar dipilih menjadi permukaan *master*, dan permukaan dengan area yang lebih kecil dipilih menjadi *slave*. Oleh karena itu, pendefinisian *slaves* dan *master* tidak boleh tertukar karena hasil numerik akan berpotensi mengalami *error*. Hasil konfigurasi *tie constraint* dapat dilihat pada gambar 4.

Selanjutnya, dilakukan pengaturan kondisi batas atau *boundary condition*. Kondisi batas merupakan suatu batasan yang harus dipenuhi dalam sebuah permodelan. Kondisi batas akan berpengaruh pada derajat kebebasan yang diikat. Pada *software* Elemen hingga pengaturan kondisi batas dapat dilakukan pada translasi dan rotasi terhadap seluruh sumbu. Kondisi batas yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah *encastre* dimana seluruh *nodes* pada permukaan yang dipilih akan di-*fix* sehingga tidak dapat terjadi translasi dan rotasi terhadap seluruh sumbu. Kondisi batas yang digunakan pada model geladak dapat dilihat pada gambar 5.

Langkah selanjutnya yang perlu dilakukan adalah pengaturan pembebanan. Nilai pembebanan pada geladak telah dihitung sebelumnya dan pada tahap ini, nilai tersebut akan di-*input* pada model geladak. Pada gambar 6 dapat dilihat pembebanan pada model geladak.

*Meshing* merupakan proses partisi suatu model menjadi beberapa elemen yang lebih kecil. Semakin kecil ukuran *mesh* maka semakin banyak jumlah elemen yang tercipta. Terdapat beberapa metode dalam pembuatan elemen *mesh*, diantaranya adalah *hexahedral*, *tetrahedral*, ataupun campuran antara keduanya. Teknik dalam pembentukan *mesh* dengan bentuk hexahedral pun terdapat beberapa jenis seperti *structured*, *sweep*, dan *bottom-up*. Pada penelitian ini digunakan *hexahedral structured mesh* sebagai teknik dalam pembentukan elemen *mesh*. Metode *meshing* ini baik digunakan dalam analisis numerik karena hasil *mesh* akan lebih rapih dan terstruktur sehingga output yang dihasilkan lebih konvergen dan lebih presisi.

Pada tahap ini, *meshing* dilakukan secara global dengan mengatur ukuran *global seeds*. Semakin kecil ukuran *global seeds* tersebut maka jumlah elemen yang tercipta akan semakin banyak. Hasil pengaturan ukuran *global seeds* dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 7. Setelah ukuran dari *global seeds* telah diatur, maka selanjutnya *mesh* dapat dilakukan menggunakan fitur *mesh part instance*. Contoh

hasil dari mesh yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 8.

#### G. Studi Konvergensi

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya mengenai *meshing*, semakin kecil ukuran elemen *mesh* maka jumlah elemen *mesh* akan semakin banyak. Jumlah elemen yang banyak akan membuat analisis numerik semakin presisi. Akan tetapi, tingginya jumlah elemen *mesh* akan menambah beban kerja dari *hardware* dan meningkatkan durasi proses *running* dari sebuah analisis. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi konvergensi (sering juga disebut sebagai analisis *grid independence*) untuk mencari jumlah elemen *mesh* yang optimal dimana hasil yang diperoleh mendekati hasil sebenarnya dengan jumlah *mesh* yang sesedikit mungkin. Selisih antara output percobaan kedua harus kurang dari 2% jika dibandingkan dengan percobaan yang pertama.

Pada gambar 9 dapat dilihat grafik studi konvergensi pada model geladak konvensional dan pada gambar 10 dapat dilihat grafik studi konvergensi pada model *sandwich*. Output nilai tegangan yang diambil pada analisis ini adalah nilai tegangan pada elemen yang konvergen. Hasil analisis numerik yang telah konvergen akan dibahas pada bab 5.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah analisis numerik telah selesai dilakukan pada model geladak konvensional dan model geladak *sandwich* maka nilai tegangan pada kedua model tersebut telah diperoleh. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada tabel 2. Pada model konvensional, nilai tegangan maksimum yang diperoleh pada model geladak konvensional adalah sebesar 110.371 MPa. Letak konsentrasi tegangan maksimum tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.

Dapat dilihat gambar 12 bahwa konsentrasi tegangan pada model konvensional tersebut terletak pada *scallop* yang terdapat pada *strong beam*. Hal tersebut terjadi karena lubang/bukaan pada sebuah struktur dapat menyebabkan tegangan terkonsentrasi pada tempat tersebut. Oleh karena itu umumnya lubang-lubang pada kapal umumnya diberi kelengkungan (*rounded*) untuk menurunkan tegangan yang terjadi pada konstruksi tersebut.

Pada model geladak *sandwich* diperoleh nilai tegangan sebesar 79.849 MPa. Apabila nilai tegangan tersebut dibandingkan dengan nilai tegangan pada model konvensional, selisih tegangannya mencapai 30.522 MPa atau sekitar 27.654% dari tegangan awal. Letak konsentrasi tegangan dapat dilihat pada Gambar 12.

Dari gambar 12 dapat dilihat bahwa letak konsentrasi tegangan pada model *sandwich* serupa dengan model konvensional, yaitu pada *scallop*. Hanya saja, pada model

geladak *sandwich* konsentrasi tegangan terjadi pada *strong beam* nomor 6 sedangkan pada model konvensional konsentrasi tegangan terjadi pada *strong beam* nomor 3.

Nilai tegangan tersebut juga perlu diperhatikan apakah telah memenuhi tegangan izin atau tidak. Standard tegangan izin baja yang digunakan pada penelitian ini adalah standard BV dimana tegangan izin dari baja adalah  $0.7 \sigma_y$ . Nilai  $\sigma_y$  baja adalah 235 MPa sehingga nilai tegangan izin yang digunakan adalah 164.5 MPa. Tegangan maksimum pada model *sandwich* tersebut berkisar antara 79.849 MPa sehingga struktur tersebut masih memenuhi tegangan izin.

#### V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah diperoleh, maka kesimpulan yang dapat diraih adalah sebagai berikut; (1)Nilai tegangan pada model konvensional adalah 219.999 MPa; (2)Nilai tegangan pada model *sandwich* adalah 139.735 MPa; (3)Pengurangan tegangan akibat penerapan pelat *sandwich* adalah sebesar 80.264 MPa atau sekitar 36.484% dari tegangan pada model konvensional; (4)Tegangan pelat *sandwich* memenuhi syarat tegangan izin.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Zubaydi, A. Budipriyanto, and W. Iswidodo, "Sandwich core material development for ship deck structure," in *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 2017, vol. 3, no. 6, pp. 86–91, doi: 10.12962/j23546026.y2017i6.3237.
- [2] N. Momcilovic 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.
- [3] Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), *Rules for The Classification and Construction Volume II, Rules for Hull 2014 Edition*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), 2014.
- [4] C. Borsellino, L. Calabrese, and A. Valenza, "Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 10–11, pp. 1709–1715, 2004, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.01.003.
- [5] S. H. Sujiatanti, A. Zubaydi, and A. Budipriyanto, "Finite element analysis of ship deck sandwich panel," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 874, no. January 2019, pp. 134–139, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.874.134.
- [6] K. V. Rathnam and L. D. Peel, "Impact resistant fiber reinforced elastomer," in *49th International SAMPE Symposium and Exhibition*, 2004, pp. 75–85.
- [7] M. A. Brooking and S. J. Kennedy, "Performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers," in *Proceedings of the RINA Conference on Double Hull Tankers*, 2004, pp. 1–2.
- [8] A. Baidowi, E. Utomo, D. K. Fiqih, and H. Indria, "Penggunaan sandwich plate system (SPS) pada konstruksi inner bottom," *KAPAL J. Ilmu Pengetah. Teknol. Kelaut.*, vol. 12, no. 2, pp. 60–68, 2015, doi: 10.14710/KPL.V12I2.8348.
- [9] L. Register's, "Rules for the application of sandwich panel construction to ship structure," United Kingdom, 2020. [Online]. Available: <https://www.lr.org/en/rules-regulations/>.
- [10] Bureau Veritas, *Rules for the Classification of Steel Ships, Part A – Classification and Surveys*, vol. 33, no. 467. Paris: Bureau Veritas, 2020.