

# Studi Pengaruh Penguatan pada Struktur Lambung Berbahan HDPE Terhadap Deformasi Kapal Menggunakan Metode Elemen Hingga

Alifiansyah Surya Adifatama, Dony Setyawan, dan Rizky Chandra Ariesta  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
e-mail: dony@na.its.ac.id

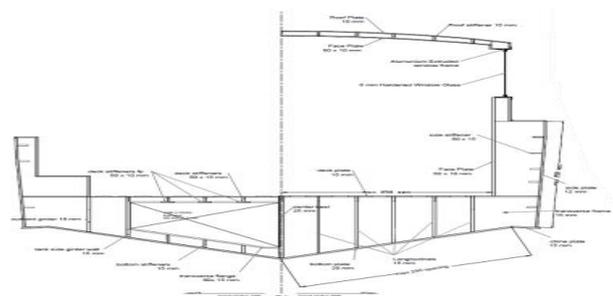
**Abstrak**—Proses perancangan kapal merupakan tahap awal yang krusial dalam pembuatan kapal, di mana penentuan dimensi kapal harus sesuai dengan tujuan dan kebutuhan kapal yang akan diproduksi. Meskipun dimensi kapal telah dihitung dengan cermat, perubahan dimensi selama masa operasional masih mungkin terjadi dan berdampak pada tegangan struktur kapal. Kapal berbahan High Density Polyethylene (HDPE) dipilih sebagai objek penelitian karena kekuatan mekanik dan ketahanannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan penguatan pada lambung kapal berbahan HDPE terhadap kekuatan kapal dan mengurangi deformasi yang terjadi. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga pada variasi kapal dengan panjang berbeda yaitu 6 m, 10,4 m, 16 m, dan 24 m, serta membandingkan penguatan menggunakan aluminium dan baja. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan penguatan pada lambung kapal berbahan HDPE secara signifikan mengurangi deformasi. Pada variasi kapal 6 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 2,321 mm. Lalu, untuk variasi model kapal 10,4 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material aluminium ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 3,357 mm. Kemudian untuk variasi model kapal 16 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 11,354 mm. Untuk variasi model kapal 24 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 8 mm dengan deformasi maksimum sebesar 41,263 mm.

**Kata Kunci**—HDPE, Kapal Patroli, Tegangan, Deformasi.

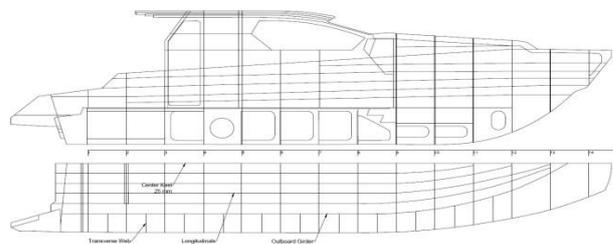
## I. PENDAHULUAN

Salah satu proses dalam pembuatan sebuah kapal adalah proses perancangan. Penentuan dimensi merupakan salah satu tahap awal dalam proses perancangan kapal. Dimensi kapal menjadi krusial karena dalam penentuannya memerlukan tujuan dan kebutuhan dari kapal yang akan diproduksi. Akan tetapi, dalam pelaksanaannya walaupun telah dilakukan perhitungan dimensi kapal dengan teliti, perubahan dimensi kapal tetap dapat dilakukan selama masa kerja kapal apabila terdapat suatu kekurangan

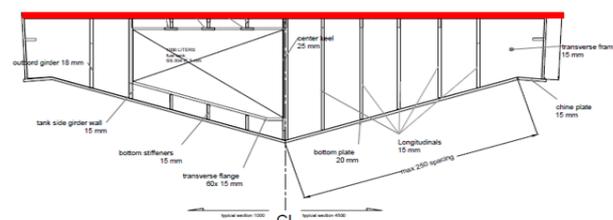
Perubahan dimensi ini akan sangat berpengaruh pada tegangan yang dialami oleh struktur kapal. Dalam proses operasional struktur kapal akan menerima berbagai beban baik beban secara internal maupun secara eksternal. Beban internal antara lain muatan dari kapal itu sendiri, dan sistem-sistem yang berada di dalam kapal. Sedangkan beban eksternal antara lain yaitu beban gelombang laut. Penting untuk memastikan bahwa tegangan yang dialami oleh struktur kapal tidak melebihi tegangan yang telah direncanakan pada saat perancangan kapal [1].



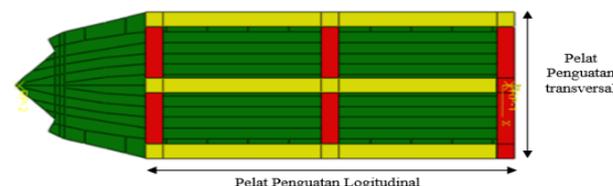
Gambar 1. Midship Section kapal 10.4 m.



Gambar 2. Construction Profile Kapal Patroli 10.4 m.



Gambar 3. Letak penguatan.



Gambar 4. Konfigurasi Penguatan Model 10,4 m.

Dalam penelitian ini, kapal berbahan *High Density Polyethylene* (HDPE) akan menjadi objek penelitian utama. HDPE merupakan salah satu bahan alternatif pengganti baja dalam konstruksi kapal yang populer dan telah banyak diterapkan dalam berbagai desain kapal [2]. Material HDPE menjadi pilihan alternatif karena HDPE memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan yang baik [3]. Penggunaan material ini juga memiliki dampak positif terhadap lingkungan karena material HDPE dapat didaur ulang.

Akan tetapi, material HDPE sebagai alternatif baja memiliki tingkat kelenturan yang besar. Dimensi kapal HDPE berpengaruh terhadap tegangan dan deformasi kapal. Semakin besar dimensi sebuah kapal HDPE, maka tegangan

Tabel 1.  
Ukuran utama Kapal

Variasi	Model Awal	Variasi	Unit
LOA	10,4	6,0	m
B	3,0	1,73	m
H	1,5	0,86	m
T	0,55	0,32	m
Material	HDPE		

Tabel 2.  
Data Ukuran Konstruksi

Bagian Struktur	Ketebalan	Unit
Pelat Alas	20	mm
Pelat Geladak	15	mm
Pelat Chine	15	mm
Pelat Center Keel	25	mm
Pelat Sisi	12	mm
Pelat Stiffener	15	mm
Pelat Transverse Web	15	mm

Tabel 3.  
Dimensi Penguatan Lambung

Panjang Model (m)	Dimensi Pelat Longitudinal		Dimensi Pelat Transversal		Tebal (mm)	Material
	P (m)	L (m)	P (m)	L (m)		
6	3,5	0,1	1,72	0,1	6; 8	Alumun; Baja
		0,15		0,15		
		0,2		0,2		
		0,25		0,25		
		0,3		0,3		
10,4	6,3	0,1	3,00	0,1	6; 8	Alumun; Baja
		0,15		0,15		
		0,2		0,2		
		0,25		0,25		
		0,3		0,3		
16	9,8	0,1	4,61	0,1	6; 8	Alumun; Baja
		0,15		0,15		
		0,2		0,2		
		0,25		0,25		
		0,3		0,3		
24	14,7	0,1	6,82	0,1	6; 8	Alumun; Baja
		0,15		0,15		
		0,2		0,2		
		0,25		0,25		
		0,3		0,3		

dan deformasi kapal juga semakin meningkat. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis penambahan konstruksi penguatan lambung pada kapal berbahan HDPE menggunakan metode elemen hingga. Penelitian ini diharapkan dapat mengurangi tingkat deformasi pada modifikasi kapal HDPE.

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Material HDPE

High Density Poly Ethylene atau HDPE adalah material plastik yang memiliki ketahanan tinggi, isolasi listrik baik, ketahanan lingkungan, dan mudah untuk dibentuk. HDPE banyak digunakan di bidang medis karena memiliki ketahanan yang bagus terhadap bahan kimia. HDPE tersusun dari atom Karbon dan Hidrogen yang membentuk produk bermolekul berat. HDPE memiliki massa jenis berkisar antar 930-970 kg/m<sup>3</sup> [4].

### B. Material Aluminium

Aluminium merupakan salah satu logam yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki berbagai keunggulan seperti ringan, tahan korosi, dan mudah dibentuk.

Tabel 4.  
Total Bending Moment

Variasi Panjang Model (m)	Variasi Ketinggian Gelombang (m)	Total Bending Moment (N.mm)	
		Hogging	Sagging
10,4	2,00	-9,66E+06	9,16E+06
	1,25	-8,91E+06	8,67E+06
	0,75	-8,29E+06	8,15E+06
	0,5	-7,98E+06	7,84E+06
	2,00	-3,77E+07	3,72E+07
16	1,25	-3,40E+07	3,38E+07
	0,75	-3,11E+07	3,10E+07
	0,5	-2,97E+07	2,95E+07

Tabel 5.  
Spesifikasi Material HDPE

Properties	Data	Unit
Density	0,95	g.cm <sup>3</sup>
Modulus Young	850	MPa
Poisson's Ratio	0,46	
Yield Stress	22	MPa
Elongation at Break	>50	%

Tabel 6.  
Spesifikasi Material Aluminium

Properties	Data	Unit
Density	2,718	g.cm <sup>3</sup>
Modulus Young	69000	MPa
Poisson's Ratio	0,33	

Tabel 7.  
Spesifikasi Material Baja

Properties	Data	Unit
Density	7,850	g.cm <sup>3</sup>
Modulus Young	200000	MPa
Poisson's Ratio	0,25	

Aluminium memiliki densitas sekitar 2,7 g/cm<sup>3</sup>, yang membuatnya lebih ringan dibandingkan banyak logam lain seperti baja. Selain itu, aluminium memiliki sifat konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta dapat didaur ulang tanpa kehilangan kualitasnya informasi tentang kekuatan dan perilaku material selama deformasi [5].

### C. Beban

Dilihat dari karakteristiknya, beban dapat dikelompokkan sebagai beban statis dan beban dinamis. Beban statis merujuk pada beban yang tidak berubah atau bergerak seiring waktu. Jumlah gaya dan momen eksternal yang bekerja pada struktur harus seimbang dengan gaya-gaya internal yang dihasilkan oleh struktur tersebut.

Beban dinamis pada struktur adalah variasi beban yang terjadi seiring waktu dan mempengaruhi respon struktur dalam hal defleksi dan tegangan. Klasifikasi beban dinamis terbagi menjadi tiga kategori utama. Pertama, beban periodik adalah beban yang berulang secara teratur dalam suatu pola. Kedua, beban kejut adalah beban yang terjadi secara tiba-tiba dan memiliki durasi singkat. Ketiga, beban acak adalah beban yang tidak teratur dalam pola dan dapat memiliki amplitudo dan frekuensi yang berbeda-beda.

### D. Bending Moment

Bending moment adalah momen yang terjadi pada suatu struktur akibat adanya gaya-gaya eksternal yang menyebabkan struktur tersebut mengalami pembengkokan atau lenturan. Momen lentur merupakan produk dari gaya

Tabel 8.  
Uji Konvergensi Kapal 10,4 m

Element Size	Jumlah Element	$\sigma$	Error $\sigma$ (%)
100	11848	28,05	
90	14316	29,77	6,13%
80	18268	31,14	4,60%
70	24250	30,61	1,70%
60	32406	31,41	2,61%
50	46310	33,72	7,35%

Tabel 9..  
Uji Konvergensi Kapal 16 m

Element Size	Jumlah Element	$\sigma$	Error $\sigma$ (%)
100	32483	68,01	
90	39356	61,39	9,73%
70	66679	69,86	13,80%
60	89869	85,07	21,77%
50	129280	88,51	4,04%
45	159178	87,8	0,80%

Tabel 10.  
Hasil Analisis Beban Statis

No	Variasi Panjang Model (m)	Tegangan (Mpa)	Deformasi (mm)
1	10,4	3,528	6,017
2	16	5,073	14,97

Tabel 11.  
Penurunan Deformasi Model 6 m

Deformasi Awal (mm)	Penguatan	Deformasi Akhir (mm)	Perbedaan (%)
4,796	Aluminium 6 mm	2,566	46%
	Aluminium 8 mm	2,567	46%
	Baja 6 mm	2,321	52%
	Baja 8 mm	2,256	53%

yang bekerja pada suatu titik pada struktur dan jaraknya dari sumbu referensi tertentu. Pada analisis ini digunakan *total bending moment*.

$$M_{\tau} = M_{SW} - M_{WV}$$

Bending moment still water (Msw) merujuk pada momen lentur yang terjadi pada struktur yang terendam dalam air tanpa adanya gelombang atau pergerakan air yang signifikan. Msw dapat dihitung dengan mempertimbangkan distribusi tekanan hidrostatis yang bekerja pada permukaan struktur yang terkena air. Distribusi tekanan hidrostatis ini bergantung pada kedalaman air, berat jenis air, dan bentuk serta ukuran struktur tersebut. *Wave bending moment* (Mwv) mengacu pada momen lentur yang terjadi pada suatu struktur akibat tekanan hidrodinamik yang dihasilkan oleh gelombang air. Tekanan hidrodinamik yang dihasilkan oleh gelombang air menyebabkan perbedaan tekanan pada sisi atas dan bawah struktur, yang menghasilkan momen lentur pada struktur tersebut [6].

### E. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah matematika fisik dan rekayasa. Analisis menggunakan metode elemen hingga didasarkan pada representasi sistem struktural yang terdiri dari elemen-elemen kecil yang kemudian membentuk jaringan elemen yang saling terhubung melalui hubungan nodal di titik-titik tertentu. Ada beberapa jenis elemen dalam metode elemen hingga yaitu elemen garis, elemen dua dimensi, elemen tiga dimensi, dan elemen aksimetris [7].

Tabel 12.  
Penurunan Deformasi Model 10,4 m

Deformasi Awal (mm)	Penguatan	Deformasi Akhir (mm)	Perbedaan (%)
6,900	Aluminium 6 mm	3,651	47%
	Aluminium 8 mm	3,367	51%
	Baja 6 mm	2,691	61%
	Baja 8 mm	2,516	64%

Tabel 13.  
Penurunan Deformasi Model 16 m

Deformasi Awal (mm)	Penguatan	Deformasi Akhir (mm)	Perbedaan (%)
22,661	Aluminium 6 mm	14,744	35%
	Aluminium 8 mm	13,724	39%
	Baja 6 mm	11,354	50%
	Baja 8 mm	10,679	53%

Tabel 14.  
Penurunan Deformasi Model 24 m

Deformasi Awal (mm)	Penguatan	Deformasi Akhir (mm)	Perbedaan (%)
78,150	Aluminium 6 mm	49,234	37%
	Aluminium 8 mm	46,890	40%
	Baja 6 mm	43,326	45%
	Baja 8 mm	41,263	47%

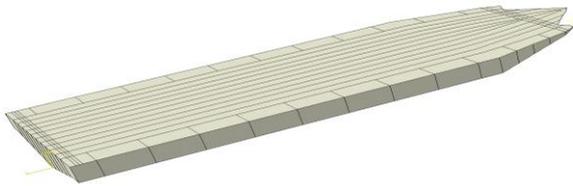
Salah satu tahap penting dalam metode elemen hingga adalah tahap meshing, yang bertujuan untuk melakukan perhitungan numerik. Pembentukan mesh atau meshing adalah proses pembuatan elemen berbentuk poligonal atau polihedral yang mendekati bentuk geometris dari suatu model. Tipe meshing dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu structured mesh dan unstructured mesh. Structured mesh adalah tipe meshing yang ditandai dengan adanya interior node meshing yang memiliki jumlah elemen yang sama pada titik pertemuan antar elemennya. Sementara itu, unstructured mesh digunakan untuk meshing model dengan bentuk geometri yang tidak teratur atau kompleks.

### F. Hydrodynamic Analysis

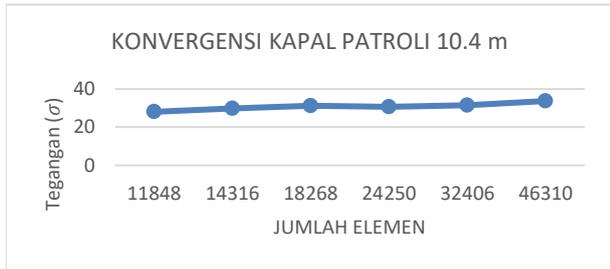
Analisis hidrodinamik merupakan studi tentang perilaku struktur dalam interaksi dengan lingkungan air, seperti gelombang, arus, dan gerakan kapal. Metode analisis hidrodinamika digunakan untuk memprediksi respons struktur terhadap beban lingkungan tersebut [8].

Gelombang laut terbentuk oleh gelombang-gelombang dengan frekuensi dan arah yang berbeda. Interaksi antara gelombang-gelombang yang berasal dari arah yang berbeda membuat kondisi gelombang menjadi sangat kompleks dan sulit untuk dimodelkan secara matematika. Software analisis hidrodinamika dapat melakukan simulasi terhadap teori gelombang orde pertama (airy wave) dan order kedua (2nd stoke wave) baik di perairan dalam maupun perairan tak hingga.

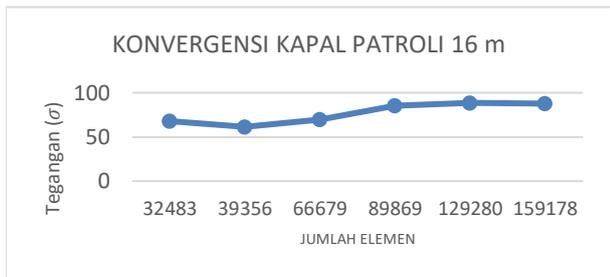
Terdapat representasi pendekatan gelombang laut berdasarkan level kompleksitasnya, yaitu regular wave berupa pendekatan perkiraan medan gelombang menggunakan komponen sinusoidal tunggal dengan tinggi, periode, dan arah tertentu, kemudian pendekatan dengan penggunaan sejumlah harmonik gelombang primer terbatas untuk mengaproksimasi sifat-sifat non-sinusoidal disebut sebagai irregular waves, lalu representasi permukaan air melalui penjumlahan tak terbatas komponen Fourier disebut dengan wave spectrum .



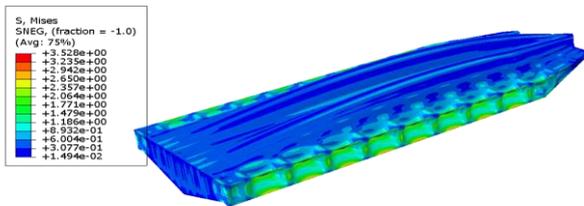
Gambar 5. Model kapal 10,4 m.



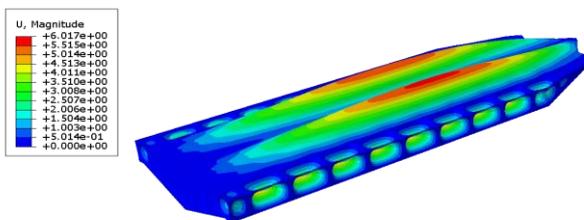
Gambar 6. Grafik uji konvergensi kapal 10,4 m.



Gambar 7. Grafik uji konvergensi kapal 16 m.



Gambar 8. Kontur tegangan beban statis.

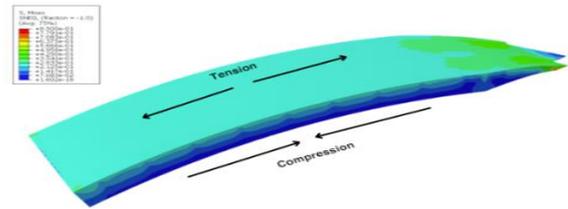


Gambar 9. Kontur deformasi beban statis.

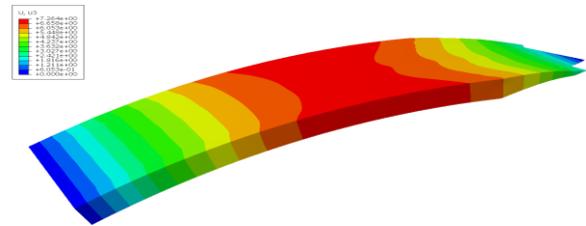
G. Tegangan

Suatu gaya bila diterapkan pada benda elastis, benda tersebut akan mengalami pemanjangan hingga mencapai batas tertentu. Pemanjangan ini sebanding dengan gaya yang diterapkan, yang berarti ada gaya yang bekerja pada setiap satuan panjang benda.

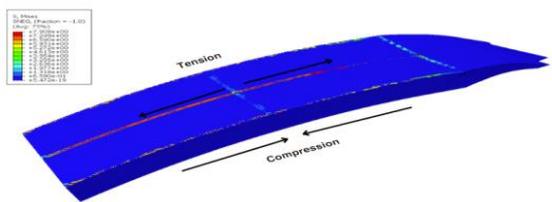
Tegangan digunakan untuk mengukur intensitas gaya atau reaksi yang terjadi pada benda per satuan luas. Tegangan dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu tegangan rekayasa (engineering stress) dan tegangan sebenarnya (true stress). Umumnya tegangan dibagi menjadi dua pengertian, yaitu gaya per satuan luas dan gaya total pada bidang yang diperhitungkan.



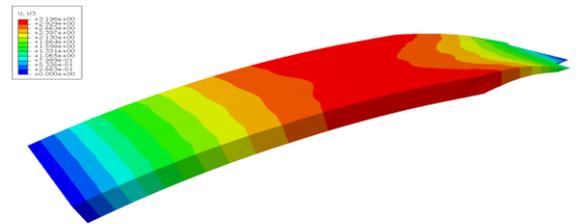
Gambar 10. Kontur tegangan beban dinamis awal.



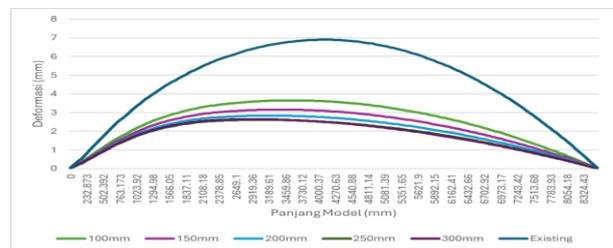
Gambar 11. Kontur deformasi beban dinamis awal.



Gambar 12. Kontur deformasi setelah pemasangan penguatan.



Gambar 13. Kontur deformasi setelah pemasangan penguatan.



Gambar 14. Grafik kontur deformasi kapal 10,4 m.

H. Deformasi

Deformasi dapat diartikan perubahan bentuk atau posisi suatu objek karena penerapan gaya atau beban eksternal. Deformasi yang terjadi pada objek dipengaruhi oleh tegangan yang diterapkannya. Deformasi elastis terjadi ketika objek kembali ke bentuk aslinya setelah beban dihilangkan. Deformasi plastis, di sisi lain, adalah deformasi permanen yang tidak dapat pulih ke bentuk aslinya.

III. METODOLOGI

A. Studi Literatur

Dalam penelitian dilakukan pencarian literatur yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

### B. Pengumpulan Data dan Penentuan Variasi

Data lain yang diperlukan adalah data konstruksi Kapal Patroli pada Tabel 1 midship section dan construction profile (Gambar 1 dan Gambar 2). Didapatkan ukuran konstruksi kapal dari Gambar 2 *midship section* dan *construction profile* (Tabel 2).

### C. Letak Penguatan

Penguatan diletakkan pada bagian atas geladak kapal berdasarkan midship section pada Gambar 3.

### D. Variasi Penguatan

Penguatan yang digunakan pada analisis terdiri dari pelat longitudinal dan pelat transversal dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4. Pelat penguatan memiliki dimensi dengan variasi yang terdapat pada Tabel 3.

### E. Perhitungan Beban

Perhitungan beban pada penelitian ini meliputi:

#### 1) Beban Statis

Beban statis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beban berdasarkan ISO 12215-5 *Small craft – Hull construction and scantlings*.

$$P_{SMP} = [P_{DM\ Base} + k_z \times \left(\frac{1}{4}P_{BMP\ Base} - P_{DM\ Base}\right) \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L$$

$$P_{DM} = P_{DM\ Base} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L$$

Dimana:

- $P_{SMP}$  : Beban tekanan sisi kapal dengan mode *planing*
- $P_{DM\ Base}$  : Beban tekanan dasar pada geladak kapal
- $P_{BMP\ Base}$  : Beban tekanan alas kapal dengan mode *planning*
- $P_{SM\ MIN}$  : Beban tekanan minimum pada sisi kapal (mode *planning* dan *displacement*)
- $k_z$  : Faktor distribusi beban tekanan vertikal
- $k_{AR}$  : Faktor reduksi area beban tekanan
- $k_{DC}$  : Faktor kategori desain
- $k_L$  : Faktor distribusi beban tekanan memanjang

#### 2) Beban Dinamis

Beban dinamis yang digunakan adalah penjumlahan *bending moment still water* dan *wave bending moment*. Rekapitulasi nilai *total bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.

### F. Pemodelan Finite Element

Pemodelan kapal dilakukan menggunakan software FEA. Contoh pemodelan FEA dapat dilihat pada Gambar 5.

### G. Material Property

Penelitian ini menggunakan material HDPE sebagai material lambung dan material baja dan aluminium untuk penguatan yang ditunjukkan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7 [2].

### H. Uji Konvergensi

Uji konvergensi adalah salah satu cara untuk menentukan ukuran *mesh* atau elemen yang optimal dalam pembuatan model analisis elemen hingga. Model dapat dikatakan konvergen apabila *margin error* pada output hasil berada di bawah 5% [9]. Hasil uji konvergensi pada model 10,4 m disajikan dalam Tabel 8 dan Gambar 6.

Hasil uji konvergensi dari kapal model 10,4 m menunjukkan bahwa konvergensi telah tercapai pada ukuran elemen 80 mm dengan jumlah elemen 18268. Ukuran ini menghasilkan *margin error* tegangan sebesar 4,6%. Tabel 9 dan Gambar 7 merupakan tabel dan grafik uji konvergensi pada model 16 m. Hasil uji konvergensi dari kapal model 16 m menunjukkan bahwa konvergensi telah tercapai pada ukuran elemen 50 mm dengan jumlah elemen 129280. Ukuran ini menghasilkan *margin error* tegangan sebesar 4,04%.

### I. Boundary Conditions

Boundary conditions atau kondisi batas yang digunakan pada analisis model yaitu “*pinned*” untuk beban statis dan “*rotational/displacement*” untuk beban dinamis.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Analisis Hasil Tegangan dan Deformasi

Analisis hasil tegangan dan deformasi meliputi:

#### 1) Analisis Beban Statis

Dari analisis penerapan beban statis pada model, didapatkan rekapitulasi hasil pada Tabel 10. Didapatkan konsentrasi tegangan pada area berwarna merah di sisi bawah kapal. Kasus ini dapat disebabkan oleh penerapan tumpuan pada bagian tersebut. Selain itu, terdapat faktor lain yang berkontribusi terhadap terjadinya tegangan maksimum di area sisi, yaitu ketebalan yang lebih tipis dibandingkan dengan area lainnya (Gambar 8).

Deformasi maksimum terjadi pada pelat sisi, diikuti oleh deformasi yang cukup signifikan pada pelat geladak. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan luas area datar pada pelat tersebut dibandingkan dengan area lainnya (Gambar 9).

#### 2) Analisis Beban Dinamis

Pada model kapal 10,4 m dan 16 m dilakukan analisis pada beban gelombang maksimum beban statis. Model kapal diberi penguatan dengan dimensi paling kecil pada tiap variasi material penguatan. Visualisasi tegangan dan deformasi model kapal 10,4 m adalah pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12.

Model dipasangkan dengan penguatan material aluminium dengan ketebalan 6 mm. Didapatkan hasil kontur tegangan dan deformasi sebagai berikut.

Pada geladak kapal terjadi tegangan tarik (*tension*) dan pada bottom kapal terjadi tegangan tekan (*compression*), hal ini berlaku juga untuk variasi beban *hogging* lainnya. Nilai ini menunjukkan adanya konsentrasi tegangan pada area berwarna merah di bagian penguatan kapal, yang menyebabkan terjadinya pengurangan tegangan pada lambung kapal model. Tegangan dan deformasi maksimum divisualisasikan dengan warna merah. Sedangkan nilai tegangan dan deformasi minimum divisualisasikan dengan warna biru yang terdapat pada legend dalam gambar visualisasi.

Gambar 13 menunjukkan terjadi penurunan deformasi pada kapal setelah dipasang penguatan. Pemasangan penguatan memiliki efektivitasnya masing-masing terhadap pengurangan deformasi kapal model. Perbandingan deformasi hasil pemasangan penguatan pada kapal dilihat pada grafik kontur kapal Gambar 14.

Dari grafik kontur Gambar 14, didapatkan deformasi maksimum pada model *existing* sebesar 6,9 mm, pada penguatan dengan tebal 6 mm dan lebar 100 mm didapatkan deformasi maksimum sebesar 3,651 mm, pada penguatan dengan tebal 6 mm dan lebar 150 mm didapatkan deformasi maksimum sebesar 3,159 mm, pada penguatan dengan tebal 6 mm dan lebar 200 mm didapatkan deformasi maksimum sebesar 2,838 mm, pada penguatan dengan tebal 6 mm dan lebar 250 mm didapatkan deformasi maksimum sebesar 2,617 mm, dan pada penguatan dengan tebal 6 mm dan lebar 300 mm didapatkan deformasi maksimum sebesar 2,643 mm.

#### B. Analisis Perbandingan Penguatan Tiap Model

Setelah mendapatkan nilai deformasi maksimum pada tiap variasi penguatan, dilakukan perbandingan hasil analisis pada nilai penurunan deformasi pada masing-masing variasi panjang kapal. Perbandingan penggunaan penguatan pada tiap model digunakan untuk mengecek efektivitas optimal penguatan dalam pengurangan deformasi. Pengambilan data perbandingan dilakukan pada beban gelombang paling besar yaitu *wave* 2 m dengan dimensi penguatan paling kecil yaitu berukuran 100 mm. Efektivitas penguatan dinilai berdasarkan persentase penurunan tingkat deformasi kapal di atas 50% dengan berat penguatan paling ringan. Beban penguatan yang ringan dan optimal akan berpengaruh minim pada *displacement* dari kapal sehingga dapat dikatakan efektif. Efektivitas pengurangan deformasi pada kapal 6 m dapat dilihat pada Tabel 11.

Untuk model dengan panjang 6 m penguatan paling efektif yaitu pada variasi alumunium dengan tebal 6 mm. Penguatan ini dinilai optimal karena memiliki persentase perbedaan yang paling dekat dengan persentase batas. Penguatan ini menyebabkan model 6 m mengalami deformasi maksimum sebesar 2,566 mm dengan persentase penurunan yaitu 46% dari deformasi awal. Data Tabel 12 menunjukkan penguatan paling optimal pada model 10,4 m adalah dengan pemasangan penguatan alumunium dengan tebal 6 mm. Penguatan alumunium dengan tebal 6 mm ini menyebabkan deformasi maksimum pada kapal 10,4 m yaitu sebesar 3,367 mm dengan persentase penurunan yaitu 51% dari deformasi awal. Untuk model dengan panjang 16 m penguatan paling efektif yaitu pada variasi baja dengan tebal 6 mm. Penguatan ini dinilai optimal karena memiliki persentase perbedaan yang paling dekat dengan persentase batas. Penguatan ini menyebabkan model 6 m mengalami deformasi maksimum sebesar 11,354 mm dengan persentase penurunan yaitu 50% dari deformasi awal (Tabel 13).

Data Tabel 14 menunjukkan penguatan paling optimal pada model 24 m adalah dengan pemasangan penguatan baja dengan tebal 8 mm. Penguatan alumunium dengan tebal 8 mm ini menyebabkan deformasi maksimum pada kapal 24 m yaitu sebesar 41,263 mm dengan persentase penurunan yaitu 47% dari deformasi awal. Pada model kapal 24 m ini variasi dimensi penguatan belum cukup untuk mencapai target

penurunan deformasi. Oleh karena itu, diperlukan dimensi yang lebih besar dalam pemasangan penguatan untuk mengoptimalkan penurunan deformasi pada kapal.

## V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian dari seluruh variasi penguatan pada kapal patroli maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Pemasangan penguatan dapat mengurangi tegangan dan tingkat deformasi pada kapal. Secara garis besar, semakin besar dimensi penguatan yang dipasangkan pada kapal, maka tegangan dan deformasi kapal juga akan semakin menurun. (2) Pada variasi kapal 6 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 2,321 mm. Lalu, untuk variasi model kapal 10,4 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material alumunium ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 3,357 mm. Kemudian untuk variasi model kapal 16 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 6 mm dengan deformasi maksimum sebesar 11,354 mm. Untuk variasi model kapal 24 m didapatkan penguatan paling optimal pada kapal yaitu pada variasi material baja ketebalan 8 mm dengan deformasi maksimum sebesar 41,263 mm.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Mairuhu, "Kekuatan struktur konstruksi kapal akibat penambahan panjang," *J. Teknol.*, vol. 8, no. 1, pp. 835–843, 2011, [Online]. Available: <https://ejournal.unpatti.ac.id/>
- [2] D. Setyawan, A. Sulisetyono, W. D. Aryawan, and R. C. Ariesta, "Finite element analysis for structural strength of high-density polyethylene material on midship boat structure," *Proceeding - 2022 IEEE Ocean Eng. Technol. Innov. Manag. Conserv. Sustain. Resilient Mar. Coast. Resour. OETIC 2022*, pp. 93–98, 2022, doi: 10.1109/OETIC57156.2022.10176242.
- [3] W. Amiruddin and H. Yudo, "Study analysis of the use of HDPE plastic as a shell on catamaran hull," *Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 12, pp. 121–133, 2020, doi: 10.34218/IJARET.11.12.2020.013.
- [4] S.-S. Cho, W.-M. Kwak, B.-S. Ham, and Y.-C. Jo, "A study on structural strength assessment of polyethylene boat," *J. Korea Acad. Coop. Soc.*, vol. 14, no. 3, pp. 1045–1053, 2013, doi: 10.5762/kais.2013.14.3.1045.
- [5] J. E. Hatch, "Properties of pure alumunium," *Science*, vol. 205, no. 4407, pp. 710–713, 1984, doi: 10.1126/science.462180.
- [6] J. Parunov, I. Senjanovi, and M. Paviaeeviae, "Use of vertical wave bending moments from hydrodynamic analysis in design of oil tankers," *Int. J. Marit. Eng.*, vol. 146, no. a4, p. 10, 2004, doi: 10.3940/rina.ijme.2004.a4.5204.
- [7] D. Logan, "A first course in the finite element method," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 3, no. 2, pp. 162–163, 2007, doi: 10.1016/0168-874x(87)90008-4.
- [8] A. Kefal and E. Oterkus, "In spection capabilities for enhanced ship safety," *Towar. Green Mar. Technol. Transp.*, vol. 1, no. 1, pp. 767–774, 2014, doi: 10.13140/RG.2.2.27534.82249.
- [9] H. Schmidt, T. Alber, T. Wehner, R. Blakytmy, and H. J. Wilke, "Discretization error when using finite element models: Analysis and evaluation of an underestimated problem," *J. Biomech.*, vol. 42, no. 12, pp. 1926–1934, 2009, doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.05.005.