

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pendahuluan

Perhitungan teknis dan analisis rekayasa yang dilakukan dalam penelitian perencanaan *load spreader* berbahan plat baja sebagai alat bantu distribusi beban pada proses peluncuran (*launching*) kapal *harbour tug* menggunakan *airbag*. Kapal yang menjadi objek penelitian ini memiliki karakteristik *keel* yang sangat tinggi, sehingga menimbulkan permasalahan distribusi beban yang tidak merata saat proses *launching* dilakukan tanpa alat bantu tambahan.

Analisis dilakukan secara sistematis mulai dari konversi data teknis kapal, perhitungan beban desain, penentuan konfigurasi *airbag*, perancangan geometri *load spreader*, hingga verifikasi kekuatan struktural seluruh komponen.

Permasalahan utama yang dijawab dalam bab ini adalah:

1. Mengapa konfigurasi tanpa *load spreader* tidak memadai secara teknis untuk kapal dengan bar keel tinggi;
2. Bagaimana *load spreader* mampu mendistribusikan beban secara merata dan menurunkan konsentrasi tekanan lokal;
3. apakah seluruh komponen struktur *load spreader* yang direncanakan memenuhi persyaratan keamanan struktural berdasarkan BKI dan SNI.

### 4.2 Data teknis kapal dan parameter perancangan

#### 4.2.1 Data Utama Kapal

Kapal yang akan digunakan sebagai objek penelitian Adalah kapal tugboat dengan data kapal sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data utama kapal harbour tug

<b>Data utama kapal</b>	<b>Dimensi</b>	<b>Satuan</b>
Length PP	26.333	m
Length Hull ( $L_{HULL}$ )	31.50	m
Breadth	11.65	m
Depth	5.50	m
Draft ( From Baseline)	4.20	m
Speed	abt.12	knots
<b>Keel</b>	<b>Dimensi</b>	<b>Satuan</b>
Tinggi bagian depan	1,735	m
Tinggi bagian tengah	1,105	m
Tinggi bagian belakang	1,205	m
lebar	0,4	m

#### 4.2.2 Data awal geometri *load spreader*

Tabel 4.2 Data awal geometri *load spreader*

Panjang <i>load spreader</i>	26,5	m
Lebar <i>load spreader</i>	12,4	m
Tinggi penumpu samping	4,80	m

### 4.2.3 Spesifikasi Material Baja *Grade AH36*

Material struktur *load spreader* menggunakan *higher strength hull structural steel Grade AH36* (ASTM A131 *Grade AH36*) sesuai BKI Pt.1 Vol.V *Rules for Materials*, Januari 2025 Edition. Section 4 B.2 *Normal and Higher Strength Hull Structural Steels*.

Meskipun *load spreader* merupakan struktur sementara, pemilihan material baja *Grade AH36* didasarkan pada pertimbangan teknis dan operasional berikut. Pertama, tegangan luluh yang lebih tinggi ( $F_y = 355$  MPa) dibandingkan *mild steel* konvensional ( $F_y = 235$  MPa) memungkinkan penggunaan profil dengan dimensi lebih kecil untuk kapasitas beban yang setara, sehingga berat total struktur dapat diminimalkan dan beban yang diterima sistem *airbag* berkurang. Kedua, material AH36 telah bersertifikasi BKI dan tersedia di galangan, sehingga menjamin kemudahan pengadaan, konsistensi kualitas, serta kemudahan fabrikasi dan pengelasan. Ketiga, karakteristik material yang lebih unggul memberikan nilai tambah berupa potensi penggunaan kembali (*reusability*) untuk operasi *launching* berikutnya. Berdasarkan pertimbangan tersebut, *Grade AH36* dipilih sebagai material yang paling sesuai secara teknis, ekonomis, dan operasional untuk aplikasi ini.

## 4.3 Karakteristik *Keel* Dan Permasalahan Distribusi Beban

### 4.3.1 Deskripsi Geometri *Keel* Dan Implikasinya

Kapal yang menjadi objek penelitian ini memiliki profil lunas dengan ketinggian yang sangat signifikan, yaitu  $h_k = \pm 1,735$  m diukur dari titik terendah *keel* hingga ke bidang dasar lambung. Ketika kapal ditempatkan di atas *airbag* dengan diameter  $D = 1,8$  m tanpa alat bantu tambahan, *keel* yang menonjol menembus bagian atas *airbag* sehingga kontak tidak terjadi pada seluruh permukaan dasar kapal, melainkan hanya terpusat pada area lebar *keel* yang sangat sempit yaitu  $b_k = 0,484$  m.

Kondisi ini menyebabkan seluruh berat kapal terkonsentrasi pada zona kontak yang sangat sempit, menghasilkan tekanan lokal yang tinggi pada *airbag* dan *keel*. Berbeda dengan kapal *flat-bottom* dimana kontak terjadi merata pada luas alas yang besar, pada *harbour tug* dengan bar *keel* tinggi, parameter  $L_d$  (panjang kontak efektif) yang digunakan dalam formula CB/T 3837 harus disamakan dengan lebar *bar keel* itu sendiri

### 4.3.2 Penetapan $L_d$ *Load spreader*

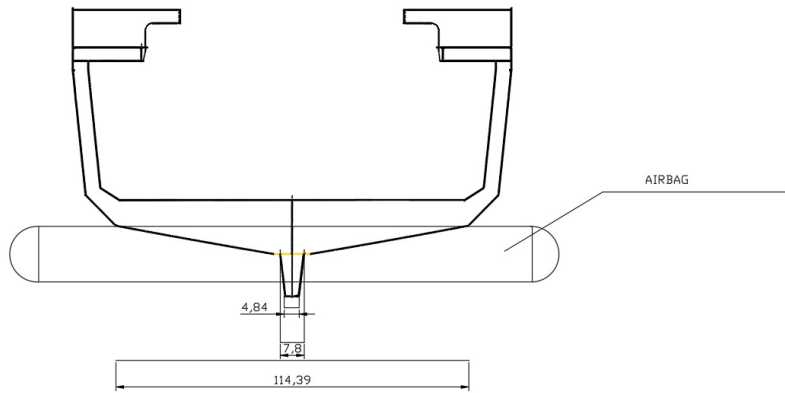
Dalam standar CB/T 3837, parameter  $L_d$  merepresentasikan dimensi zona kontak efektif antara struktur kapal dan *airbag*. Untuk kondisi tanpa *load spreader* pada kapal ini,  $L_d$  ditetapkan sebagai berikut :

$$L_d (\text{tanpa } \textit{load spreader}) = b_k$$

$$b_k = 0,484 \text{ m}$$

keterangan :

$b_k$  = lebar *bar keel* dalam arah memanjang kapal, dan zona kontak dengan permukaan *airbag*



Gambar 4.1 Kontak keel dengan aibag tanpa load spreader

### 4.3.3 Penetapan $L_d$ dengan load spreader

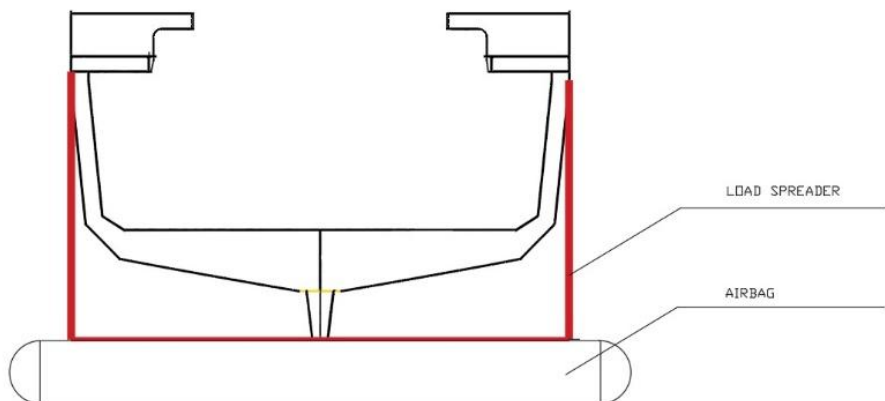
Dalam standar CB/T 3837, parameter  $L_d$  merepresentasikan dimensi zona kontak efektif antara struktur kapal dan airbag. Untuk kondisi dengan *load spreader* pada kapal ini,  $L_d$  ditetapkan sebagai berikut:

$L_d$  ( dengan *load spreader*) =  $b_k$

$b_k = 12,4$  m

keterangan :

$b_k$  = lebar *bar keel* dalam arah memanjang kapal, dan zona kontak dengan permukaan *airbag*



Gambar 4.2 Kontak keel dengan airbag menggunakan load spreader

### 4.3.4 Potensi Mode Kegagalan Tanpa *Load spreader*

Tabel 4.3 Potensi mode kegagalan tanpa *load spreader*

No.	Mode Kegagalan	Mekanisme	Konsekuensi
1	<i>Overpressure airbag</i>	Beban kapal terkonsentrasi pada area kontak bar keel dengan $Ld = 0,484$ m, sehingga tekanan lokal pada airbag meningkat.	<i>Airbag</i> mengalami deformasi berlebih atau penurunan kemampuan dukung.
2	Deformasi lokal keel	Reaksi tumpuan bekerja pada area <i>keel</i> yang relatif sempit, sehingga tegangan lokal pada struktur <i>keel</i> meningkat.	Terjadi deformasi lokal, indentasi, atau kerusakan pada <i>keel</i> dan pelat dasar
3	Ketidastabilan lateral	Kontak tumpuan yang sempit dapat menimbulkan distribusi reaksi kiri-kanan yang tidak seimbang.	Kapalberpotensi mengalami kemiringan lateral saat proses <i>launching</i> .
4	Pergeseran posisi <i>airbag</i>	Tekanan kontak yang tidak merata menyebabkan deformasi <i>airbag</i> tidak seragam dan dapat mendorong <i>airbag</i> keluar dari posisi rencana.	Posisi tumpuan berubah dan distribusi reaksi menjadi tidak terkendali
5	Redistribusi beban berlebih	Jika satu <i>airbag</i> kehilangan kapasitas dukung, beban akan berpindah ke <i>airbag</i> lain di sekitarnya.	Beban pada <i>airbag</i> lain meningkat dan faktor keamanan sistem menurun.

Berdasarkan Tabel 4.3, kondisi tanpa *load spreader* memiliki risiko utama berupa konsentrasi tekanan pada area *keel* dan ketidakmerataan reaksi tumpuan pada *airbag*. Oleh karena itu, *load spreader* diperlukan untuk memperbesar bidang kontak, menurunkan tekanan lokal, dan membantu mendistribusikan beban kapal secara lebih merata ke sistem *airbag*.

## 4.4 Konversi Berat Kapal Dan Beban Desain

### 4.4.1 Konversi *Lightship Weight* Ke Gaya Vertikal

Berat kapal dalam kondisi *lightship* dikonversi ke gaya vertikal (kN)

$$W = m \times g$$

Dimana :

W = konversi gaya

M = masa

g = percepatan gravitasi  $9,81 \text{ m/s}^2$

Perhitungan :

W =  $m \times g$

W =  $585,691 \times 9,81$

W =  $5.745,927 \text{ kN}$

Jadi,  $5.745 \text{ kN}$  adalah gaya total akibat gravitasi (bukan perhitungan beban desain)

### 4.4.2 Beban Desain Total ( Termasuk Berat *Load spreader* )

Bedasarkan rekapitulasi berat profil baja, berat aktual struktur *load spreader* diperoleh sebesar :

$$W_{LS} = 71,344 \text{ Ton}$$

Dalam perancangan, berat *load spreader* dibulatkan menjadi

$$W_{LS} = 73 \text{ Ton}$$

Pembulatan dilakukan untuk mengakomodasi tambahan berat akibat pekerjaan fabrikasi, seperti sambungan las, bracket, pelat pengaku tambahan, penumpu lokal dan toleransi berat material.

Dalam kondisi sebenarnya *airbag* menanggung berat kapal sekaligus berat *load spreader*. Total berat desain dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} W_{\text{total}} &= W_{\text{kapal}} + W_{LS} \\ W &= (585,691 + 73) \times 9,81 \\ W &= 658,691 \times 9,81 \\ W &= 6.461,75 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 4.4.3 Koefisien Blok pada kondisi *launching*

Koefisien blok ( $C_B$ ) merupakan salah satu koefisien bentuk kapal yang menunjukkan perbandingan antara volume badan kapal yang tercelup air dengan volume balok pembanding yang dibatasi oleh panjang kapal, lebar kapal, dan sarat kapal. Secara umum, koefisien blok dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta = L \times B \times T \times C_B \times \rho$$

Sehingga :

$$C_B = \frac{\Delta}{L \times B \times T \times \rho}$$

Dimana :

- $\Delta$  : Displacement kapal
- L : Panjang kapal
- B : Lebar kapal
- T : Sarat kapal
- $C_B$  : Koefisien blok
- $\rho$  : Massa jenis air laut

Pada kondisi *launching*, kapal berada pada kondisi *lightship*, sehingga *displacement* yang relevan adalah berat *lightship* kapal. Oleh karena itu, koefisien blok yang digunakan dalam perhitungan ini merupakan koefisien blok ekuivalen pada kondisi *lightship* atau kondisi *launching*, bukan koefisien blok pada kondisi muatan penuh.

Maka koefisien blok kondisi *lightship* dihitung sebagai berikut :

$$C_{B,LS} = \frac{LWT}{L_{PP} \cdot B \cdot T_{LS} \cdot \rho}$$

Dimana :

- $C_{BLS}$  : Koefisien blok kondisi *lightship*
- $L_{pp}$  : Panjang kapal
- B : Lebar kapal
- T : Sarat kapal
- $T_{LS}$  : Draft after *Lighthship*
- $\rho$  : Massa jenis air laut

Bedasarkan data kapal, diperoleh :

$$\begin{aligned} V &= 12 \text{ Knot} \\ V_s &= 6,173 \text{ m/s} \\ L_{PP} &= 26,333 \text{ m} \\ T_{LS} &= 3,241 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LWT} &= 585,691 \text{ ton} \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Maka :

$$C_{B,LS} = \frac{LWT}{L_{PP} \cdot B \cdot T_{LS} \cdot \rho}$$

$$C_{B,LS} = \frac{LWT}{L_{PP} \cdot B \cdot T_{LS} \cdot \rho}$$

$$C_{B,LS} = \frac{585,691}{26,333 \cdot 11,65 \cdot 3,241 \cdot 1,025}$$

$$C_{B,LS} = \frac{585,691}{1018,84} = 0,575$$

Dengan demikian, nilai koefisien blok yang digunakan untuk *launching* adalah:

$$C_B = 0,57$$

#### 4.5 Analisis Luas area Distribusi Beban

##### 4.5.1 Analisis Kondisi Tanpa *Load spreader*

Tanpa alat bantu penyebar beban atau disini disebut sebagai *load spreader* seluruh beban kapal terkonsentrasi pada area *keel* dengan lebar *keel* 0,484 m. Semakin kecil lebar kontak dengan *airbag* semakin besar tegangan lokal yang diterima oleh *airbag*. kondisi ini kritis karena beresiko dapat menyebabkan kerusakan fatal pada *airbag*. Ilustrasi tekanan yang diterima *airbag* oleh *keel* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Luas kontak} &= \text{keel} \times \text{panjang kapal} \\ &= 0,484 \times 26,5 \\ &= 12,826 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

##### 4.5.2 Analisis kondisi dengan *load spreader*

$$\begin{aligned} \text{Luas kontak} &= \text{lebar } \textit{load spreader} \times \text{panjang kapal} \\ &= 12,4 \times 26,5 \\ &= 328,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

#### 4.6 Perhitungan jumlah *airbag*

##### 4.6.1 Data dan spesifikasi *airbag*

Berikut adalah data dan spesifikasi *airbag* yang digunakan dalam penelitian ini :

Tabel 4.4 Data dan spesifikasi *airbag*

No.	Parameter Airbag	Simbol	Nilai	Satuan	Referensi
1	Diameter nominal	D	1,8	m	CB/T 3837
2	Panjang <i>airbag</i>	La	16	m	Data lapangan
3	Tekanan kerja	p <sub>w</sub>	0,11 – 0,14	MPa	CB/T 3837
4	Kapasitas permeter panjang	R	138,22	kN/m	Data aktual lapangan
5	Kapasitas satu <i>airbag</i>	F <sub>ab</sub> = R × La	2.211,52	kN/buah	Hasil perhitungan
6	<i>Airbag</i> cadangan / <i>rolling</i>	N <sub>1</sub>	2	buah	CB/T 3837

No.	Parameter Airbag	Simbol	Nilai	Satuan	Referensi
7	Faktor keamanan konstanta	$K_1$	1,2	—	CB/T 3837
8	Jumlah lapisan cord sintetis	n	6	lapisan	CB/T
9	Koefisien blok desain	$C_B$	0,57	—	Estimasi konservatif

#### 4.6.2 Persamaan jumlah *airbag* ( CB/T 3837)

$$N = \frac{K_1 \cdot Q \cdot g}{C_B \cdot R_a \cdot L_d} + N_1$$

N = Jumlah *airbag* (Pcs)

$K_1$  = Nilai konstanta 1,2~1,3

Q = Berat kapal yang akan diluncurkan ( ton)

g = Percepatan Gravitasi ( $m/s^2$ )

$C_B$  = koefisien blok

$L_d$  = Panjang kontak antara *airbag* dengan alas lambung pada bagian tengah kapal (m)

R = Garansi kekuatan bantalan *airbag* per satuan panjang dari *airbag* (kN/m)

$N_1$  = Jumlah *airbag* yang diganti terus menerus biasanya dibutuhkan 2~4

#### 4.6.3 Konfigurasi penataan *airbag* pada metode *end launching*

Metode peluncuran yang digunakan dalam penelitian ini adalah *end launching type*, yaitu metode peluncuran kapal dengan arah gerak sejajar terhadap sumbu memanjang kapal. Pada konfigurasi ini, proses *launching* direncanakan dimulai dari sisi buritan atau *stern launching*, sehingga bagian buritan kapal terlebih dahulu bergerak menuju perairan.

Berdasarkan ISO 17682:2013 Annex A, penataan *airbag* pada metode *end launching* dapat dilakukan dengan tiga konfigurasi, yaitu *linear arrangement*, *staggered arrangement*, dan *two-lines arrangement*. Pemilihan konfigurasi tersebut ditentukan berdasarkan perbandingan antara lebar kapal dan panjang efektif *airbag*. Pada penelitian ini digunakan konfigurasi *linear arrangement*, karena panjang *airbag* yang digunakan lebih besar dari lebar bidang yang ditumpu.

*Airbag* yang digunakan memiliki panjang :

$$L_a = 16 \text{ m}$$

Sedangkan lebar kapal dan lebar *load spreader* adalah :

$$B = 11,65 \text{ m}$$

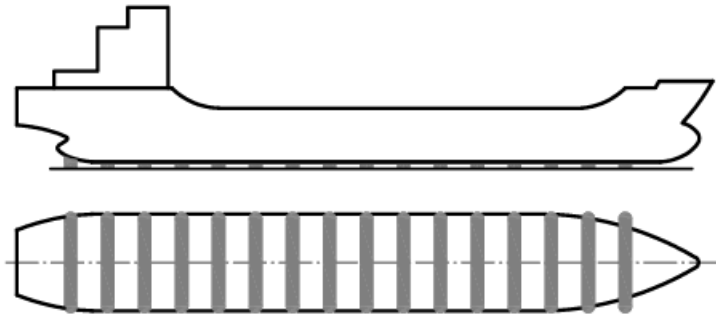
$$B_{\text{load spreader}} = 12,4 \text{ m}$$

Karena

$$L_a > B$$

$$L_a > B_{\text{Load spreader}}$$

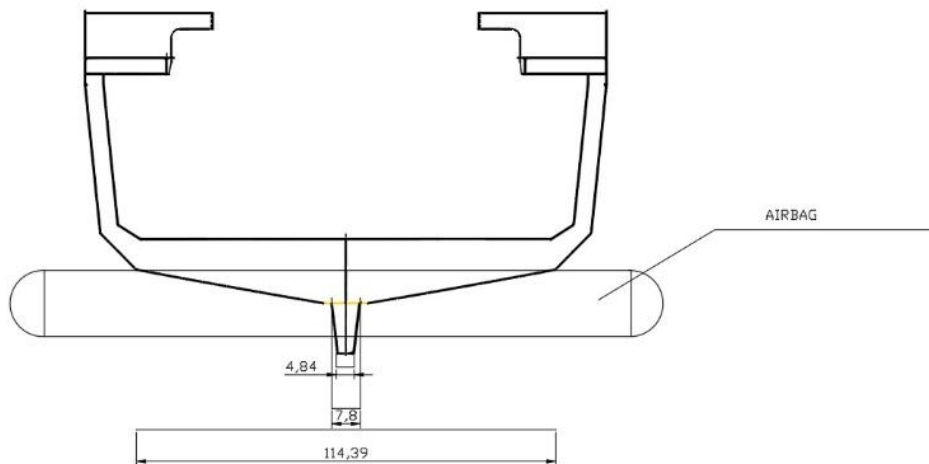
Maka konfigurasi *linear arrangement* dapat diterapkan. Pada konfigurasi ini, *airbag* disusun melintang terhadap arah memanjang kapal, sehingga sumbu panjang *airbag* tegak lurus terhadap arah gerak *launching*. Dengan susunan tersebut, *airbag* mampu menjangkau seluruh lebar bidang tumpuan, baik pada kondisi kapal langsung terhadap *airbag* maupun pada kondisi menggunakan *load spreader*.



Gambar 4.3 Konfigurasi *linear arrangement*

#### 4.6.4 Perhitungan jumlah *airbag* dan tekanan tanpa *load spreader*

Pada kondisi tanpa alat penyebar beban (*load spreader*), beban kapal langsung diteruskan ke *airbag* melalui area *keel*. Karena tinggi *keel* kapal  $\pm 175$  m hampir sama dengan diameter *airbag* 1,8 m, maka kontak efektif tidak terjadi pada seluruh bidang dasar kapal, melainkan hanya pada area *keel*. Oleh karena itu, panjang kontak efektif pada kondisi tanpa *load spreader* diambil sebesar lebar kontak *keel*, yaitu  $L_d = 0,484$  m. Kondisi ini menyebabkan distribusi beban menjadi terkonsentrasi dan meningkatkan tekanan lokal pada *airbag*.



Gambar 4.4 Kontak *keel* dengan *airbag* tanpa *load spreader*

$$N = \frac{K_1 \cdot Q \cdot g}{C_B \cdot R_a \cdot L_d} + N_1$$

Dimana :

Tabel 4.5 Konfigurasi perhitungan *airbag*

$K_1$	= 1,2
$Q$	= 585,691 ton
$g$	= 9,81 m/s <sup>2</sup>
$C_B$	= 0,57
$L_d$	= 0,484 m

$$\begin{aligned} R &= 138,22 \text{ kN/m} \\ N_1 &= 2 \end{aligned}$$

Maka dari data tersebut didapat :

$$\begin{aligned} N &= \frac{K_1 \cdot Q \cdot g}{C_B \cdot R_a \cdot L_d} + N_1 \\ N &= \frac{1,2 \times 585,691 \times 9,81}{0,57 \times 138,22 \times 0,484} + 2 \\ N &= \frac{6.895,12}{381,32} + 2 \\ N &= 18,08 + 2 = 20,18 \\ N &= 21 \text{ buah } \textit{airbag} \end{aligned}$$

Bedasarkan hasil perhitungan, kondisi tanpa *load spreader* membutuhkan jumlah *airbag* sebesar 21 buah. Jumlah yang didapat tidak layak diterapkan secara fisik karena diameter setiap *airbag* adalah 1,8 m. Tanpa memperhitungkan jarak antar *airbag*, total panjang yang dibutuhkan adalah  $21 \times 1,8 = 37,8$  m. Nilai yang didapat sudah melebihi panjang efektif penempatan *airbag*, yaitu 26,5 m. Dengan demikian, konfigurasi 21 *airbag* tanpa *load spreader* tidak sesuai secara geometris dan tidak dapat diterapkan secara aman dilapangan

#### 4.6.4.1 Tekanan perairbag tanpa loadspreader

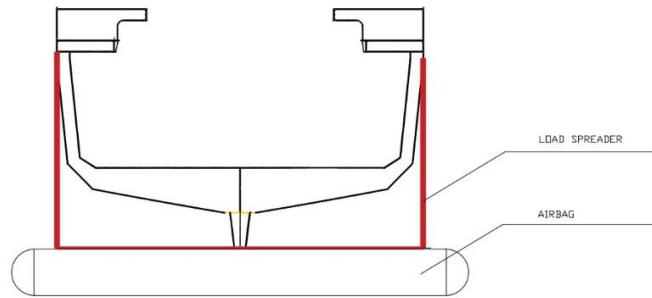
Setelah jumlah *airbag* ditentukan, selanjutnya dihitung tekanan yang diterima oleh setiap *airbag* pada kondisi menggunakan *load spreader*. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui besarnya tekanan kerja yang diterima setiap *airbag* sebagai dasar evaluasi terhadap kapasitas kerja *airbag* yang digunakan.

$$\begin{aligned} P &= \frac{5745,927}{N \times \textit{Lebar} \times \textit{Diamter Airbag}} \\ &= \frac{5745,927}{19 \times 0,484 \times 1,5} \\ &= 416,68 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tekanan yang diterima setiap *airbag* sebesar 416,68 kN/m<sup>2</sup>. Nilai ini selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi keamanan penggunaan *airbag* pada konfigurasi peluncuran dengan *load spreader*.

#### 4.6.5 Perhitungan jumlah airbag dengan load spreader

Pada kondisi dengan *load spreader*, beban kapal tidak langsung bekerja pada *airbag* melalui area *keel*, tetapi terlebih dahulu diterima oleh struktur *load spreader*. Struktur ini berfungsi memperluas bidang kontak dan membantu mendistribusikan beban secara lebih merata ke sistem *airbag*. Oleh karena itu, panjang kontak efektif ( $L_d$ ) pada kondisi ini ditetapkan berdasarkan lebar bidang distribusi *load spreader*  $l_d = 12,4$  m. Nilai tersebut digunakan dalam perhitungan jumlah *airbag* untuk konfigurasi *launching* dengan *load spreader*



Gambar 4.5 Kontak keel dengan airbag menggunakan load spreader

$$N = \frac{K_1 \cdot Q \cdot g}{C_B \cdot R_a \cdot L_d} + N_1$$

Dimana :

Tabel 4.6 Konfigurasi perhitungan airbag

$K_1$	= 1,2
$Q$	= 585,691 ton + 73 ton = 658,691 ton
$g$	= 9,81 m/s <sup>2</sup>
$C_B$	= 0,57
$L_d$	= 12,4 m
$R$	= 138,22 kN/m
$N_1$	= 2

Maka :

$$N = \frac{K_1 \cdot Q \cdot g}{C_B \cdot R_a \cdot L_d} + N_1$$

$$N = \frac{1,2 \cdot 658,691 \cdot 9,81}{0,57 \cdot 138,22 \cdot 12,4} + 2$$

$$N = \frac{7.754,11}{976,94} + 2$$

$$N = 7,93 + 2 = 9,93$$

$$N = 10 \text{ buah airbag}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah airbag aktif yang dibutuhkan adalah  $N_{aktif} = 7,93$ , sehingga dibulatkan menjadi 8 buah. Sesuai ketentuan CB/T 3837-2011, ditambahkan  $N_1 = 2$  sebagai airbag tambahan/rolling, sehingga jumlah total airbag yang digunakan adalah:

$$N_{total} = 8 + 2 = 10 \text{ buah airbag}$$

Dalam penerapannya, 8 airbag digunakan sebagai tumpuan utama, sedangkan 2 airbag tambahan ditempatkan pada area yang menerima beban lebih besar, seperti area aft atau sekitar kamar mesin. Konfigurasi ini lebih layak dibandingkan kondisi tanpa load spreader karena jumlah airbag lebih sedikit, distribusi beban lebih merata, dan masih dapat diterapkan secara geometris di lapangan

#### 4.6.5.1 Tekanan perairbag dengan loadspreader

Setelah jumlah airbag pada konfigurasi load spreader diperoleh, langkah berikutnya adalah menghitung tekanan yang diterima oleh setiap airbag. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan bahwa tekanan kerja pada masing-masing airbag masih berada dalam batas kapasitas yang diizinkan sehingga proses peluncuran dapat berlangsung dengan aman.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{N \times \text{Lebar} \times \text{Diameter Airbag}} \\
 &= \frac{6461,75}{8 \times 12,4 \times 1,5} \\
 &= 43,42 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, tekanan yang diterima setiap *airbag* sebesar 43,42 kN/m<sup>2</sup>. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *penggunaan load spreader* mampu mendistribusikan beban kapal secara lebih merata sehingga tekanan yang bekerja pada *airbag* lebih kecil dibandingkan konfigurasi tanpa *load spreader*.

#### 4.6.6 Perbandingan efisiensi jumlah *airbag*

Tabel 4.7 Perbandingan efisiensi jumlah *airbag*

Parameter	Skenario A (Tanpa LS)	Skenario B (Dengan LS)	Selisih	Nilai (%)
Panjang kontak efektif (Ld)	0,484 m (lebar keel)	12,4 m (lebar LS)	Naik 11,916 m atau Naik 25,62×	+2.463 % (pakai nilai 100%)
Massa yang diperhitungkan (Q)	585,691 ton	658,691 ton	Naik 73 ton	+12,46 %
Jumlah <i>airbag</i> (N)	21 buah	10 buah	Berkurang 11	+(52,38%) (lebih baik)
Distribusi beban	Terkonsentrasi (keel) 12,826 m <sup>2</sup>	Merata (328,6 m <sup>2</sup> )	Meningkat 315,774 m <sup>2</sup>	+2.463%
Tekanan <i>airbag</i>	416,68 kN/m <sup>2</sup>	43,42 kN/m <sup>2</sup>	Menurun 373,26%	+ 89,58% (lebih baik)
Risiko kegagalan <i>airbag</i>	Sangat tinggi	Rendah	—	

Efektivitas total mempertimbangkan 3 aspek :

$$\text{Efektivitas total} : \frac{100\% - 12,46\% + 52,38\% + 100\% + 89,458\%}{5} = 65,90\%$$

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap lima parameter, yaitu panjang kontak efektif, massa yang diperhitungkan, jumlah *airbag*, distribusi beban, dan tekanan *airbag*, diperoleh nilai efektivitas total sebesar 65,90%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penerapan *load spreader* cukup efektif dalam meningkatkan distribusi beban, mengurangi jumlah *airbag* yang dibutuhkan, serta menurunkan tekanan yang diterima *airbag*, meskipun terjadi peningkatan massa akibat penambahan struktur *load spreader*.

#### 4.7 Perhitungan jarak *airbag*

Penentuan jarak antar *airbag* mengacu pada CB/T 3837 section 5.3 dan ISO17682:2013 pasal 5.2.7 menyatakan jarak antar *center to center* antar *airbag* harus memenuhi batas maksimum dan minimum dengan persamaan sebagai berikut.

Persamaan jarak antar *airbag* (CB/T 3837-2011, Sec.5.3) :

$$\begin{aligned}
 \frac{L}{N-1} &\leq 6k \\
 \frac{L}{N-1} &\geq \frac{\pi D}{2} + 0,3
 \end{aligned}$$

- L : panjang aktual dasar kapal yang dapat kontak dengan airbag
- N : Jumlah airbag
- D : Diameter nominal airbag
- k : 1 untuk kapal baja

Dengan :

$$S = \frac{L}{N - 1}$$

- L : Panjang aktual dasar kapal yang dapat kontak dengan airbag
- S : Jarak
- N : Jumlah airbag

#### 4.7.1 Perhitungan jarak tanpa *load spreader*

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah airbag tanpa *load spreader*, jumlah *airbag* yang dibutuhkan adalah :

$$N = 21 - 2 \text{ Buah}$$

$$N = 19 \text{ Airbag Aktif}$$

Maka jarak antar *airbag* adalah :

$$\begin{aligned} S &= \frac{L}{N - 1} \\ S &= \frac{31,5}{19 - 1} \\ S &= 1,75 \text{ m} \end{aligned}$$

Validasi batas maksimum berdasarkan ISO 17682:2013:

$$\begin{aligned} \frac{L}{N - 1} &\leq 6k \\ \frac{31,5}{19 - 1} &\leq 6(1) \\ \frac{1,75}{1,75} &\leq 6,0 \end{aligned}$$

Maka jarak *airbag* memenuhi batas maksimum.

Validasi batas minimum berdasarkan ISO 17682:2013:

$$\begin{aligned} \frac{L}{N - 1} &\geq \frac{\pi D}{2} + 0,3 \\ \frac{31,5}{19 - 1} &\geq \frac{3,14 \times 1,8}{2} + 0,3 \\ 1,75 &< 3,126 \end{aligned}$$

Karena

$$1,75 < 3,126$$

Maka syarat antar *airbag* adalah :

$$3,126 \leq 1,66 \leq 6,0$$

Maka konfigurasi 19 *airbag* tanpa *load spreader* tidak memenuhi syarat minimum jarak antar *airbag* berdasarkan ISO 17682:2013.

#### 4.7.2 Perhitungan jarak dengan *load spreader*

Pada kondisi dengan *load spreader*, jumlah total *airbag* hasil perhitungan adalah 10 buah. Dari jumlah tersebut, 2 *airbag* merupakan *airbag* tambahan/*rolling*, sehingga jumlah *airbag* aktif yang digunakan sebagai tumpuan tetap adalah:

$$N = 10 - 2 \text{ Buah}$$

$$N = 8 \text{ Airbag Aktif}$$

Maka jarak antar *airbag* adalah :

$$S = \frac{L}{N - 1}$$

$$S = \frac{26,5}{8 - 1}$$

$$S = 3,79 \text{ m}$$

Validasi batas maksimum berdasarkan ISO 17682:2013 :

$$\frac{L}{N - 1} \leq 6k$$

$$\frac{26,5}{8 - 1} \leq 6(1)$$

$$\frac{3,79}{3,79} \leq 6,0$$

Maka jarak *airbag* memenuhi batas maksimum.

Validasi batas minimum berdasarkan ISO 17682:2013:

$$\frac{L}{N - 1} \geq \frac{\pi D}{2} + 0,3$$

$$\frac{26,5}{8 - 1} \geq \frac{3,14 \times 1,8}{2} + 0,3$$

$$\frac{3,79}{3,79} \geq 3,126$$

Maka jarak *airbag* memenuhi batas minimum

Dengan demikian, konfigurasi 8 *airbag* aktif dengan *load spreader* memenuhi persyaratan jarak antar *airbag* berdasarkan SO 17682:2013, karena nilai jarak aktual berada di antara batas minimum dan maksimum:

$$3,126 \leq 3,79 \leq 6,0$$

#### 4.7.3 Hasil akhir validasi jarak *airbag*

Tabel 4. 8 Hasil akhir validasi jarak *airbag*

Kondisi	Jumlah Airbag Aktif	Nilai Jarak	Batas Minimum Iso 17682:2013	Batas Maksimum Iso 17682:2013	Status
Tanpa <i>load spreader</i>	19 buah	1,75 m	$S \geq 3,126 \text{ m}$	$S \leq 6,0 \text{ m}$	Tidak memenuhi
Dengan <i>load spreader</i>	8 buah	3,79 m	$S \geq 3,126 \text{ m}$	$S \leq 6,0 \text{ m}$	memenuhi



Berdasarkan hasil perhitungan jarak antar *airbag*, konfigurasi tanpa *load spreader* menghasilkan jarak sebesar 1,75 m, sehingga tidak memenuhi batas minimum ISO 17682:2013. Pada konfigurasi dengan *load spreader*, jarak antar 8 *airbag* aktif adalah 3,79 m. Nilai tersebut berada dalam rentang yang disyaratkan, yaitu  $3,126 \text{ m} \leq S \leq 6,0 \text{ m}$ . Oleh karena itu, jarak penataan *airbag* yang digunakan pada penelitian ini adalah 3,79 m secara *center-to-center*.

#### 4.8 Jenis desain dan konsep struktural *load spreader*

##### 4.8.1 Struktural dan referensi perancangan

*Load spreader* pada penelitian ini dirancang menggunakan konsep *open grillage structure* yang dikombinasikan dengan *bottom plate* sebagai bidang kontak terhadap *ship launching airbag*. Sistem struktur terdiri atas *longitudinal stiffener*, *transverse frame*, *center girder*, dan *side girder* yang bekerja secara terpadu dalam mendistribusikan beban kapal menuju *airbag*. Pada area kontak antara kapal dan *load spreader* dipasang *elastomer pad* untuk mengurangi konsentrasi tegangan lokal, mengurangi gesekan pada bagian *bottom*, serta mencegah kerusakan pada struktur lambung akibat kontak langsung dengan komponen baja. Selain itu, penggunaan *adjustable keel block seat* memungkinkan penyesuaian posisi tumpuan terhadap variasi bentuk lunas kapal sehingga kontak beban dapat terdistribusi secara lebih merata.

Untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur, *load spreader* dilengkapi dengan sistem *X-bracing* yang berfungsi mengurangi deformasi lateral serta meningkatkan ketahanan terhadap beban tidak simetris selama proses *undocking*. Sementara itu, penerapan sistem *knockdown modular* memberikan kemudahan dalam proses fabrikasi, pemasangan, dan penggunaan ulang pada proyek peluncuran kapal berikutnya.

Penambahan *bottom plate* pada bagian bawah struktur berfungsi menghasilkan bidang kontak yang kontinu terhadap *airbag* sehingga tekanan yang diterima dapat didistribusikan secara lebih merata. Keberadaan pelat ini juga mencegah *airbag* masuk ke dalam celah antar frame, mengurangi risiko kerusakan *airbag* akibat kontak langsung dengan profil struktur, serta meningkatkan efektivitas transfer beban dari kapal menuju sistem *airbag*. Dengan kombinasi *center girder*, *side girder*, *elastomer pad*, *adjustable keel block seat*, sistem *bracing*, dan *bottom plate*, *load spreader* yang dirancang tidak

hanya memenuhi aspek kekuatan struktur, tetapi juga meningkatkan keamanan operasi, efisiensi distribusi beban, kemudahan fabrikasi, dan keandalan selama proses undocking kapal.

#### 4.8.2 Dasar Penentuan dimensional *Load spreader*

*Load spreader* dirancang sebagai struktur *truss cradle* yang berfungsi mendistribusikan beban kapal secara merata ke *airbag* dibawahnya sekaligus menjaga kestabilan lateral selama proses peluncuran. desain ini mengadopsi konstruksi kapal tongkang :

##### 1. Panjang *load spreader*

Panjang *load spreader* ditentukan berdasarkan panjang antara garis tegak (LPP), karena distribusi beban utama kapal terjadi pada bagian tersebut. Penggunaan LPP juga memberikan efisiensi struktur dengan mengurangi panjang yang tidak efektif seperti overhang pada haluan dan buritan, serta meminimalkan risiko interferensi dengan komponen propulsi di buritan. Margin depan + belakang = 0,10 m – 0,20 m per sisi.

$$L = LPP + 2 \times \text{margin}$$

$$\text{Margin} = 0,10 \text{ m}$$

$$L = 26,333 + 2(0,10)$$

$$L = 26,333 + 0,20 = 26,533 \text{ m}$$

$$L = 26,5$$

##### 2. Lebar *load spreader*

Lebar *load spreader* adalah lebar kapal asli ditambahkan toleransi ( *clearance* 0,5 m – 0,10 m )

$$B_{\min} = 11,65 + 0,5 = 12,15 \text{ m}$$

$$B_{\max} = 11,65 + 0,75 = 12,65 \text{ m}$$

Lebar ideal ( diambil tengah )

$$B_{\text{ideal}} = 11,65 + 0,75 = 12,40 \text{ m}$$

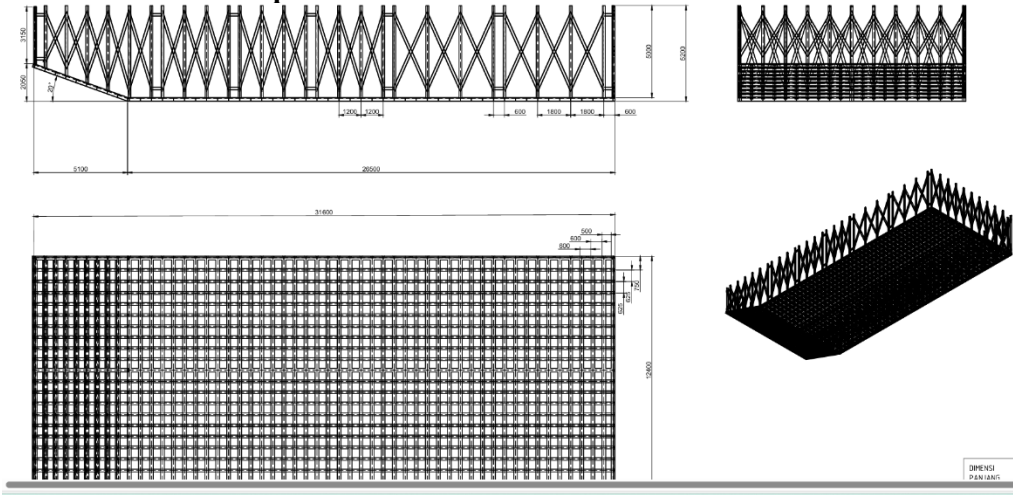
##### 3. Tinggi penumpu samping

Penumpu samping ini akan dipasang secara vertikal di bagian samping kapal sepanjang garis air atau syarat Tinggi rangka dibatasi agar tetap memberikan *clearance* terhadap deck kapal minimal  $\pm 0,70$  m guna menghindari kontak saat terjadi deformasi *airbag* dan pergerakan dinamis kapal.

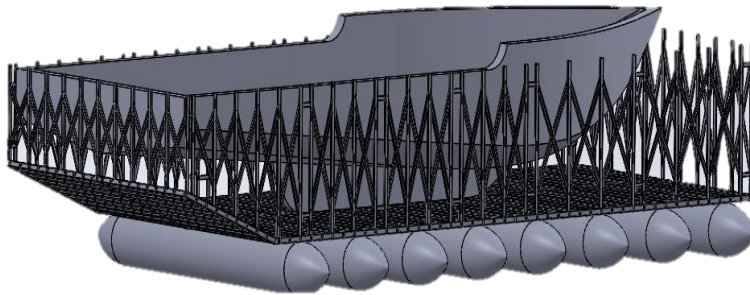
Tabel 4. 9 Spesifikasi *load spreader*

Panjang <i>load spreader</i>	26,5 m
Lebar <i>load spreader</i>	12,4 m
Tinggi penumpu samping	4,80 m

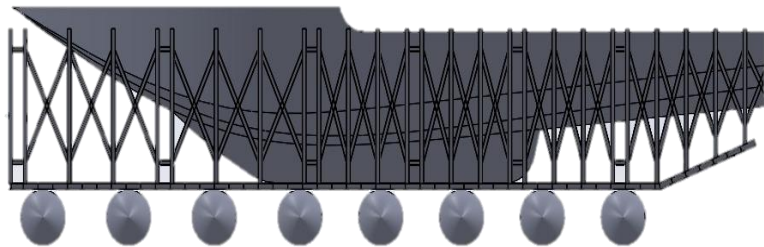
### 4.8.3 Desain peralatan luncur



Gambar 4.6 Desain *load spreader* secara keseluruhan



Gambar 4.7 Desain *load spreader* 3D



Gambar 4.8 Desain *load spreader* tampak samping

#### 4.8.4 Spacing

*Spacing stiffener longitudinal* dan transversal diambil dengan ukuran 600 x 600 mm berdasarkan pertimbangan :

Tabel 4. 10 Dasar penentuan spacing

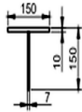
No.	Aspek Teknis	Penjelasan	Nilai / Referensi
1	Keamanan agar <i>airbag</i> tidak menyelip	Lebar celah antar stiffener (600 mm) dengan diameter <i>airbag</i> (1.800 mm) berfungsi agar <i>airbag</i> tidak dapat masuk ke celah	600 mm < 1.800 mm
2	Kekakuan lokal <i>bottom plate</i>	Panel 600×600 mm dengan t = 12 mm memenuhi batas minimum SNI 7971:2013; kekakuan lokal dibantu oleh stiffener 600×600 mm.	$t/a = 12/600 = 0,020$
3	Ketentuan BKI Sec.9 A.1.1	Frame spacing $\leq 600$ mm untuk area <i>bottom struktur</i> L < 90 m yang menerima beban signifikan	BKI Vol.II Sec.9 A.1.1
4	Cegah deformasi lokal plat	Panel lebih kecil menghasilkan lendutan jauh lebih kecil ( $\delta \sim a^4$ : jika a turun 40%, $\delta$ turun 71%)	Analisis teoritis
5	SNI 7971:2013	Jarak maksimum elemen pendukung $\leq 600$ mm untuk mencegah tekuk lokal plat tipis	SNI 7971:2013

#### 4.8.5 Komponen struktur *Load spreader*

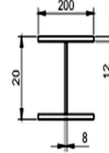
Komponen struktur utama yang digunakan dalam konstruksi *load spreader* ini terdiri dari kombinasi profil H-Beam, T-Beam dan Channel (C ). Dengan detail sebagai berikut :

## DETAIL PLAT

1. VERTICAL WALL STIFFNER



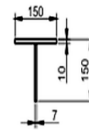
3. CENTER, BORDER & TRANSVERSAL BEAM



2. DIAGONAL & HORIZONTAL WALL STIFFENER



4. LONGITUDINAL BOTTOM STIFFENER

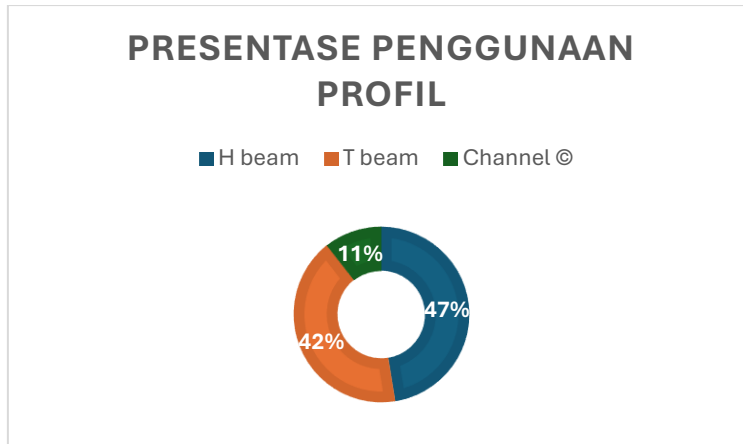


Gambar 4.9 Komponen struktur *load spreader*

Tabel 4.11 Rincian komponen struktur *load spreader*

No.	Komponen	Profil	Jumlah	Fungsi Utama
1	Longitudinal Stiffener	T 150×150×7×10 mm	22 buah	Kekakuan longitudinal bottom plate
2	Transverse Frame	H 200×200×8×12 mm	46 buah	Kekakuan transversal, transfer ke girder
3	Center Girder	H 200×200×8×12 mm	1 buah	Distribusi beban longitudinal centerline
4	Side Girder (kanan-kiri-depan-belakang)	H 200×200×8×12 mm	4 buah	Distribusi beban longitudinal sisi
5	X-Bracing	C 150×75×9×12,5 mm	Sesuai kebutuhan	Lateral bracing, cegah lateral buckling
6	Vertical Leg (penumpu samping)	T 150×150×7×10 mm	Min. 30 buah	Meneruskan beban vertikal ke airbag

Untuk presentase penggunaan profil didominasi olhe H beam dan kemudia T beam sesuai dengan grafik presentase dibawah ini:



#### 4.9 Data perancangan dan penentuan beban distribusi struktur

##### 4.9.1 Data berat dan gaya vertikal total

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{kapal}} &= 585,691 \text{ ton} \\
 Q_{\text{LS}} &= 73 \text{ ton} \\
 g &= 9,81 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa total} &= Q_{\text{kapal}} + Q_{\text{LS}} \\
 &= 585,691 + 73 \\
 &= 658,691 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya vertikal total} &= \text{massa total} \times g \\
 &= 658,691 \times 9,81 \\
 &= 6.461,75 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

##### 4.9.2 Dimensi dan luas bidang *load spreader*

Tabel 4.12 Dimensional *load spreader*

Panjang <i>load spreader</i> ( $L_{LS}$ )	= 26,5 m
Lebar <i>load spreader</i> ( $B_{LS}$ )	= 12,4 m
Luas bidang distribusi beban ( $A_{LS}$ )	= $L_{LS} \times B_{LS}$
	= 26,5 x 12,4
	= 328,6 m <sup>2</sup>

##### 4.9.3 Material baja

Tabel 4. 13 Spesifikasi material baja

Material	$F_y$	$E$	Keterangan
ASTM A131 Grade AH36	355 MPa	200.000 MPa	Baja kapal

1. Pendekatan ASD (ASD (*allowable strength design*)) atau dalam bahasa indonesia DKI (Desain Kekuatan Izin) digunakan untuk menentukan tegangan izin lentur. Perhitungan tegangan izin bertujuan untuk mengetahui batas tegangan maksimum yang masih diizinkan bekerja pada material sehingga struktur tetap berada dalam kondisi aman selama menerima beban:

$$\sigma_{ijin} = \frac{F_y}{\Omega_b}$$

Tegangan izin lentur dihitung menggunakan persamaan diatas dengan faktor keamanan :

$$\Omega_b = 1,67$$

Sehingga diperoleh nilai tegangan izin lentur material AH36 sebagai berikut:

$$\sigma_{ijin,AH36} = \frac{355}{1,67}$$

$$\sigma_{ijin,AH36} = 212,6 \text{ MPa}$$

Bedasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai tegangan izin lentur sebesar 212,6 Mpa. Nilai tersebut menjadi batas maksimum tegangan lentur yang diizinkan bekerja pada material ASTM A31 Grade AH36 sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi keamana struktur load spreader.

## 2. Tegangan izin geser awal

Selain tegangan lentur, tegangan izin geser juga perlu dihitung untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan gaya geser yang bekerja selama proses peluncuran kapal. Perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan ASD dengan faktor keamanan  $\Omega_v = 1,67$ .

$$T_{ijin,AH36} = \frac{0,6F_y}{\Omega_v}$$

Dengan :

$$\Omega_v = 1,67$$

Maka :

$$T_{ijin,AH36} = \frac{0,6 \times 355}{1,67}$$

$$T_{ijin,AH36} = 127,5 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai tegangan izin geser material ASTM A131 Grade AH36 adalah sebesar 127,5 MPa. Nilai tersebut digunakan sebagai batas tegangan geser yang diizinkan sehingga struktur tetap memenuhi persyaratan kekuatan selama menerima beban operasi

### 4.9.4 Beban distribusi ekuivalen pada *load spreader*

Karena *load spreader* adalah rangka terbuka dengan *bottom plat*, maka beban total di konversi menjadi beban ekuivalen  $P_{eq}$  untuk membantu pembagian beban ke setiap elemen balok.

$$\begin{aligned} P_{eq} &= \frac{W_{total}}{A_{LS}} \\ &= \frac{6.461,75}{328,6} \\ &= 19,66 / \text{m}^2 \\ &\approx 20 \text{ kN} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

Beban garis pada balok dihitung dengan :

$$q = P_{eq} \times b_{trib}$$

Dengan :

$b_{trib}$  = lebar tributary yang dipikul balok

$b_{trib}$  = spacing = 0,6 m

#### 4.10 Perhitungan *design pressure*

*Design pressure* ( $p_B$ ) merupakan tekanan ekuivalen rata-rata yang bekerja pada bidang *bottom plate load spreader* akibat beban vertikal total yang diteruskan dari kapal. Nilai  $p_B$  digunakan sebagai parameter dasar dalam perencanaan scantling elemen struktur *load spreader*, meliputi *bottom plate*, *stiffener*, *transverse frame*, dan *girder*. Dalam penelitian ini,  $p_B$  dihitung berdasarkan pembagian beban total  $W_{total}$  terhadap luas bidang efektif  $L \times B$ .

$$\left( p_B = \frac{W_{total}}{L \times B} \right)$$

$p_B$	: <i>Design pressure</i>
$W_{total}$	: Total beban desain yang diterima oleh sistem <i>airbag</i>
$L$	: panjang <i>load spreader</i>
$B$	: Lebar <i>load spreader</i>
$Q_{kapal}$	: Massa kapal <i>lightship</i>
$W_{LS}$	: berat estimasi <i>load spreader</i>
$A_{LS}$	: luas total bidang bawah <i>load spreader</i>

Maka :

$$\begin{aligned} A_{LS} &= L \times B = 26,5 \times 12,4 \\ &= 328,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan *design pressure* mengikuti rumus diatas :

$$\begin{aligned} W_{total} &= (Q_{kapal} + W_{LS}) \times g \\ &= (585,691 + 73) \times 9,81 \\ &= 658,691 \times 9,81 \\ &= 6\,461,75 \text{ Kn} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_B &= \frac{W_{total}}{A_{LS}} = \frac{6\,461,75}{328,6} = 19,66 \text{ kPa} \\ &= 20,0 \text{ kPa} \end{aligned}$$

#### 4.11 Dasar perhitungan balok

Elemen struktur *load spreader* digambarkan sebagai *simply supported beam* dengan beban merata. Gambar digunakan sebagai idealisasi awal karena kekakuan sambungan rangka tidak digambarkan secara rinci. Untuk balok sederhana dengan beban merata :

$$V_{max} = \frac{qL}{2}$$

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8}$$

Tegangan lentur dihitung dengan :

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{W}$$

Persamaan dasar :

$$\sigma = \frac{M_y}{I}$$

Dan :

$$w = \frac{I}{y}$$

Sehingga :

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Dari materi merancang kapal II menjelaskan hubungan I , section modulus W , dan tegangan lentur pada penampang balok.

Dari hubungan tersebut, section modulus minimum dapat ditentukan dengan :

$$W_{\min} = \frac{M_{\max}}{\sigma_{ijin}}$$

Syarat profil terhadap lentur :

$$W_{\text{aktual}} \geq W_{\min}$$

Cek tegangan dasar :

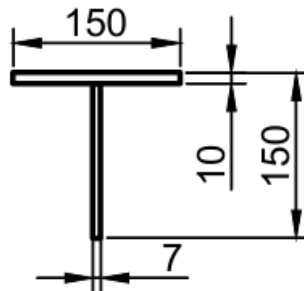
$$\tau = \frac{M_{\max}}{AW}$$

Syarat aman :

$$\tau \leq \tau_{ijin}$$

## 4.12 Scantling longitudinal stiffener dengan ukuran T 150 x 150 x 7x 10 mm

### 4.12.1 Geometri penampang



Gambar 4.10 Dimensional scantling longitudinal stiffener

1. Profil T 150x150x7x10 mm :

Tabel 4.14 Spesifikasi profil T

Tinggi badan	: 150 mm
Lebar sayap	: 150 mm
Tebal badan	: 7 mm
Tebal sayap	: 10 mm

$$A_{\text{sayap}} = 150 \times 10 = 1.500 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{badan}} = 150 \times 7 = 1.050 \text{ mm}^2$$

$$A = A_{\text{sayap}} + A_{\text{badan}}$$

$$A = 1.500 + 1.050$$

$$A = 2.550 \text{ mm}^2$$

2. Titik berat dari tepi bawah flens ( $\bar{y}$ ):

Titik berat flens

$$y_{\text{sayap}} = \frac{t_{\text{sayap}}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}$$

Titik berat badan / web :

$$y_{\text{badan}} = y_{\text{badan}} = \frac{t_{\text{sayap}} + h_{\text{badan}}}{2} = \frac{10 + 150}{2} = 85 \text{ mm}$$

Maka :

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{A_{\text{sayap}} y_{\text{sayap}} + A_{\text{badan}} y_{\text{badan}}}{A} \\ &= \frac{(1.500 \times 5) + (1.050 \times 85)}{2.550} \\ &= 37,94 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Momen inersia terhadap sumbu x

$$\begin{aligned} I_{\text{sayap}} &= \frac{150 \times 10^3}{12} + 1.500(5 - 37,94)^2 = 12.500 + 1.627.650 \\ &= 1.640.150 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{badan}} &= \frac{7 \times 150^3}{12} + 1.050(85 - 37,94)^2 = 1.968.750 + 2.325.435 \\ &= 4.294.185 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_x = 1.640.150 + 4.294.185 = 5.934.335 \text{ mm}^4$$

4. Section modulus

$$W_x = \frac{I_x}{c_{\text{max}}} = \frac{5.934.335}{122,06} = 48.618 \text{ mm}^3 \approx 48,6 \text{ cm}^3$$

#### 4.12.2 Beban garis, gaya geser, dan momen lentur

Tekanan ekuivalen ( $P_{LS}$ ) = 20 Kn/m<sup>2</sup>

Lebar tributary stiffener ( $b_{\text{trib}}$ ) = 0,6 m

Bentang Stiffener (L) = 0,6 m

1. Beban garis

$$\begin{aligned} q &= p_{\text{eq}} \times b_{\text{trib}} \\ &= 20 \times 0,6 \\ &= 12 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2. Gaya geser maksimum

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} &= \frac{qL}{2} \\ &= \frac{12 \times 0,6}{2} \\ &= 3,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

3. Momen lentur maksimum

$$\begin{aligned}
 M_{\max} &= \frac{qL^2}{8} \\
 &= \frac{12 \times 0,6^2}{8} \\
 &= 0,54 \text{ kN/m} \\
 &= 540.000 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

#### 4.12.3 Section modulus minimum

Section modulus minimum dengan material ASTM *Grade* AH36

$$\begin{aligned}
 W_{\min} &= \frac{540.000}{212,6} \\
 &= 2.540 \text{ mm}^3 \\
 &= 2,54 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Lakukan pengecekan untuk memastikan batas aman terpenuhi  
 $48,6 > 2,54 \text{ cm}^3$

Nilai section modulus memenuhi

#### 4.12.4 Verifikasi Tegangan lentur aktual

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{M_{\max}}{W_{\text{aktual}}} \\
 &= \frac{540.000}{48.600} \\
 &= 11,11 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$11,11 < 212,6$$

Nilai tegangan lentur aktual Memenuhi

#### 4.12.5 Verifikasi Tegangan geser aktual

$$\begin{aligned}
 A_w &= 1.050 \text{ mm}^2 \\
 \tau &= \frac{V_{\max}}{A_w} \\
 &= \frac{3.600}{1.050} \\
 &= 3,43 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$3,43 < 127,5$$

Nilai tegangan geser memenuhi

#### 4.12.6 Verifikasi tambahan berdasarkan BKI sec.9

Sebagai pembanding, BKI Sec.9 menyatakan bahwa section modulus dan shear area frame/ stiffener tidak boleh kurang dari nilai minimum. Untuk *tween deck and supersctructure frames*, BKI memberikan rumus section modulus :

$$W_t = 0,55 \cdot m \cdot a \cdot l^2 \cdot p \cdot c_r \cdot k$$

Dan Shear area :

$$A_t = (1 - 0,817m_a) \cdot 0,05 \cdot a \cdot l \cdot p \cdot k$$

Dalam penelitian ini, rumus tersebut tidak dipakai sebagai dasar utama karena *load spreader* bukan bagian dari struktur kapal, tetapi digunakan sebagai verifikasi perbandingan.

Untuk ASTM AH36:

$$k = 0,72$$

$$W_t = 0,55 \times 1,0 \times 0,6 \times 0,6^2 \times 20 \times 1,0 \times 0,72$$

$$W_{tAH36} = 1,71 \text{ cm}^3$$

Cek :

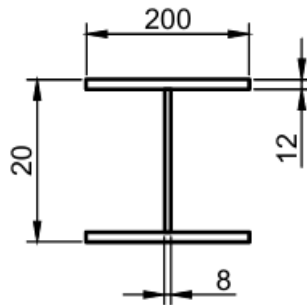
$$48,6 > 1,71$$

Nilai yang dihasilkan telah memenuhi

### 4.13 Scantling Transverse Frame untuk H 200 x 200 x 8 x 12 mm

Perhitungan scantling *transverse frame* dilakukan untuk mengetahui kemampuan profil H 200 x 200 x 8 x 12 mm dalam menahan beban yang bekerja pada *load spreader*. Sebelum dilakukan perhitungan kekuatan, terlebih dahulu ditentukan geometri penampang sebagai dasar perhitungan sifat-sifat penampang

#### 4.13.1 Geometri Penampang



Gambar 4.11 Dimensional *scantling transverse frame*

Geometri penampang profil H 200 x 200 x 8 x 12 mm yang digunakan sebagai *transverse frame* ditunjukkan pada Gambar 4.11. Dimensi penampang tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan sifat-sifat penampang yang diperlukan pada perhitungan kekuatan struktur.

1. Profil H 200 x 200 x 8 x 12 mm :

Tabel 4. 15 Spesifikasi profil H

Tinggi badan	: 200 mm
Lebar sayap	: 200 mm
Tebal badan	: 8 mm
Tebal sayap	: 12 mm

$$A_{\text{sayap atas}} = 200 \times 12 = 2.400 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{sayap bawah}} = 200 \times 12 = 2.400 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{badan}} = 176 \times 8 = 1.408 \text{ mm}^2$$

$$A = A_{\text{sayap atas}} + A_{\text{badan}} + A_{\text{atas}}$$

$$A = 2.400 + 2.400 + 1.408$$

$$A = 6.208 \text{ mm}^2$$

2. Titik berat penampang

Bentuk profil H yang simetris, titik berat berada ditengah penampang. Namun untuk pembuktian, dihitung dari tepi bawah profil.

Jarak titik berat sayap bawah :

$$y_{\text{sayap}} = \frac{t_{\text{sayap}}}{2} = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

Jarak titik berat badan :

$$y_{\text{badan}} = y_{\text{badan}} = \frac{h}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}$$

Jarak titik berat sayap atas :

$$\begin{aligned} \bar{y} &= 200 \frac{12}{2} \\ &= 200 \frac{12}{2} \\ &= 194 \text{ mm} \end{aligned}$$

Maka titik berat total :

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{(2.400 \times 6) + (1.408 \times 100) + (2.400 \times 194)}{6.208} \\ &= \frac{14.400 + 140.800 + 465.600}{6.208} \\ &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Momen inersia terhadap sumbu x

Karena penampang simetris, jarak dari sumbu netral ke pusat masing-masing sayap adalah :

$$\begin{aligned} d &= 100 - 6 \\ &= 94 \text{ mm} \end{aligned}$$

Momen inersia sayap atas dan bawah :

$$\begin{aligned} I_{\text{sayap}} &= \frac{200 \times 12^3}{12} + 2.400(94)^2 = 28.800 + 21.206.400 \\ &= 21.235.200 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Karena ada dua sayap :

$$2I_{\text{sayap}} = 2 \times 21.235.200 = 42.470.400 \text{ mm}^4$$

Momen inersia badan :

$$\begin{aligned} I_{\text{badan}} &= \frac{8 \times 176^3}{12} \\ &= 3.634.517 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Momen inersia total :

$$I_x = 42.470.400 + 3.634.517 = 46.104.917 \text{ mm}^4$$

4. Section modulus

Jarak dari sumbu netral ke serat terluar :

$$\begin{aligned}c &= \frac{h}{2} \\ &= \frac{200}{2} \\ &= 100 \text{ mm}\end{aligned}$$

Section modulus :

$$W_x = \frac{I_x}{c_{max}} = \frac{46.104.917}{100} = 461.049 \text{ mm}^3 \approx 461.05 \text{ Cm}^3$$

#### 4.13.2 Beban garis, gaya geser dan momen lentur

Perhitungan beban garis, gaya geser, dan momen lentur pada *transverse frame* dilakukan untuk mengetahui besarnya beban yang diterima serta respons struktur akibat tekanan yang bekerja pada *load spreader*. Parameter yang digunakan meliputi tekanan ekuivalen, bentang *transverse frame*, dan lebar daerah tributari sebagaimana ditunjukkan pada perhitungan berikut :

Tekanan ekuivalen

$$P_{eq} = 20 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Bentang transverse (LT)

$$LT = 6,2 \text{ m}$$

Lebar tributary transverse frame :

$$b_{trib,T} = 0,6 \text{ m}$$

1. Beban garis transverse frame :

Beban garis pada *transverse frame* dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tekanan ekuivalen dengan lebar tributari. Nilai ini merupakan beban merata yang bekerja sepanjang bentang profil.

$$\begin{aligned}qT &= P_{eq} \times b_{trib,T} \\ &= 20 \times 0,6 \\ &= 12 \text{ Kn} / \text{m}\end{aligned}$$

2. Gaya geser maksimum

Berdasarkan nilai beban garis yang diperoleh, selanjutnya dihitung gaya geser maksimum yang bekerja pada *transverse frame* dengan asumsi balok sederhana yang menerima beban merata.

$$\begin{aligned}V_{max,T} &= \frac{qTLT}{2} \\ &= \frac{12 \times 6,2}{2} \\ &= 37,2 \text{ kN} \\ &= 37.200 \text{ N}\end{aligned}$$

3. Momen lentur :

Selain gaya geser, momen lentur maksimum juga dihitung untuk mengetahui besarnya momen yang harus mampu ditahan oleh profil *transverse frame* selama menerima pembebanan.

$$\begin{aligned}
 M_{\max,T} &= \frac{qTL^2T}{8} \\
 &= \frac{12(6,2)^2}{8} \\
 &= 57,66 \text{ kN}\cdot\text{m} \\
 &= 57.660.000 \text{ N}\cdot\text{mm}
 \end{aligned}$$

4. Section modulus minimum :

Berdasarkan momen lentur maksimum yang telah diperoleh, selanjutnya dihitung kebutuhan *section modulus* minimum. Nilai ini digunakan untuk mengetahui apakah profil H 200 × 200 × 8 × 12 mm memiliki kapasitas penampang yang cukup dalam menahan momen lentur yang bekerja.

$$\begin{aligned}
 W_{\min,T} &= \frac{M_{\max,T}}{\sigma_{ijin}} \\
 &= \frac{57.660.000}{212,6} \\
 &= 271.213 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

5. Tegangan lentur aktual :

Setelah diperoleh nilai *section modulus* penampang, dilakukan perhitungan tegangan lentur aktual untuk mengevaluasi besarnya tegangan yang terjadi pada profil akibat momen lentur maksimum.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{b,T} &= \frac{M_{\max,T}}{W_x} \\
 &= \frac{57.660.000}{461.049} \\
 &= 125,06 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

6. Luas geser h beam :

Luas bidang geser (*shear area*) profil H-Beam dihitung sebagai dasar dalam menentukan tegangan geser aktual yang bekerja pada penampang.

$$\begin{aligned}
 A_w &= 176 \times 8 \\
 &= 1.408 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

7. Tegangan geser aktual :

Nilai tegangan geser aktual dihitung berdasarkan gaya geser maksimum yang diterima oleh *transverse frame* dan luas bidang geser penampang.

$$\begin{aligned}
 \tau_T &= \frac{V_{\max,T}}{A_w} \\
 &= \frac{37200}{1408} \\
 &= 26,42 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

8. Tegangan geser izin :  
Selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan geser izin sebagai acuan untuk mengevaluasi keamanan penampang terhadap pembebanan geser. Profil dinyatakan aman apabila tegangan geser aktual lebih kecil daripada tegangan geser izin.

$$\begin{aligned}\tau_{ijin} &= 0,6 \sigma_{ijin} \\ &= 0,6(212,6) \\ &= 127,56 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Maka

$$\begin{aligned}\tau_T &< \tau_{ijin} \\ 26,42 &< 127,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Memenuhi ( aman )

Berdasarkan seluruh hasil perhitungan, profil H 200 × 200 × 8 × 12 mm memiliki kapasitas yang memadai untuk digunakan sebagai *transverse frame* pada struktur *load spreader*. Nilai tegangan lentur aktual sebesar 125,06 MPa masih berada di bawah tegangan lentur izin sebesar 212,6 MPa, sedangkan tegangan geser aktual sebesar 26,42 MPa juga lebih kecil dibandingkan tegangan geser izin sebesar 127,57 MPa. Dengan demikian, profil yang digunakan memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan metode *Allowable Strength Design (ASD)* dan dinyatakan aman terhadap pembebanan yang bekerja.

#### 4.13.3 Verifikasi

##### 1. Verifikasi section modulus minimum

$$W_x > W_{\min}$$

$$461.049 > 271.213$$

Nilai memenuhi

##### 2. Verifikasi tegangan lentur

$$\sigma_{b,T} < \sigma_{ijin,AH36}$$

$$125,06 \text{ MPa} < 212,6$$

Nilai memenuhi

##### 3. Verifikasi tegangan geser

$$\begin{aligned}\tau_T &< \tau_{ijin} \\ 26,42 &< 127,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Nilai memenuhi

#### 4.14 Klasifikasi elemen langsing dan tak langsing berdasarkan SNI 1729:2020

Klasifikasi elemen penampang dilakukan untuk menentukan apakah elemen profil H termasuk kategori langsing atau tidak langsing berdasarkan ketentuan SNI 1729:2020. Penentuan klasifikasi dilakukan dengan membandingkan rasio lebar terhadap tebal (*width-to-thickness ratio*) dengan nilai batas yang dipersyaratkan. :

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

Dengan syarat :

$\lambda \leq \lambda_r$  artinya tak langsing

$\lambda > \lambda_r$  artinya langsing

Untuk sayap profil I,T, dan C :

$$\lambda = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Untuk badan T :

$$\lambda = 0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Untuk badan C :

$$\lambda = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Dengan :

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 355 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{200.000}{355}}$$

$$\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 23,74$$

Nilai batas rasio lebar terhadap tebal untuk sayap dan badan dihitung menggunakan nilai modulus elastisitas ( $E$ ) dan tegangan leleh ( $F_y$ ) material ASTM A131 Grade AH36. Hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan klasifikasi masing-masing elemen penampang.

Batas sayap :

$$\lambda_{r,f} = 0,56 (23,74) = 13,29$$

Batas badan T :

$$\lambda_{r,wT} = 0,75 (23,74) = 17,81$$

Batas badan C :

$$\lambda_{r,w,C} = 1,49 (23,74) = 35,37$$

#### 4.14.1 Profil T 150 X 150 X 7 X 10 mm

Sayap T

$$\lambda_f = \frac{150 / 2}{10} = 7,50$$

Badan T :

$$\lambda_w = \frac{150}{7} = 21,43$$

Cek sayap :  
 $7,50 < 13,29$

Sayap T termasuk tak langsing

Cek badan :  
 $21,43 > 17,81$

Badan T termasuk langsing apabila digunakan sebagai batang tekan aksial

#### 4.14.2 Profil H 200 X 200 X 8 X 12 mm

Sayap H :  
 $\lambda_r = \frac{200 / 2}{12}$   
 $= 8,33$

Badan H :  
 $\lambda_w = \frac{176}{8}$   
 $= 22,00$

Cek sayap :  
 $8,33 < 13,29$

Cek badan :  
 $22,00 < 35,37$

Profil H tak langsing

#### 4.14.3 Profil C 150 X 150 X 75 X 9 X 12,5 mm

Sayap C :  
 $\lambda_w = \frac{75}{12,5}$   
 $= 6,00$

Badan C :  
 $\lambda_w = 150 - 2 (12,5)$

$h_w = 125 \text{ mm}$

$\lambda_w = 125 / 9$

$\lambda_w = 13,89$

Cek sayap :  
 $6,00 < 13,29$

Cek badan :  
 $13,89 < 35,37$

Profil C dikategorikan dalam tak langsing

### 4.15 Analisa tekuk vertikal leg dan X – Bracing berdasarkan SNI 1729:2020 Bab E

Struktur *load spreader* memiliki elemen yang bekerja sebagai batang tekan, yaitu vertikal leg dan sebagian elemen X- Bracing pada saat menerima gaya tekan. Elemen tekan tidak hanya dapat gagal akibat tegangan material yang melebihi tegangan izin, tetapi juga dapat gagal akibat ketidakstabilan bentuk yang disebut tekuk atau buckling.

Vertical leg dan X-bracing diperiksa berdasarkan ketentuan komponen tekan pada SNI 1729:2020 Bab E. Pemeriksaan dilakukan dengan menggunakan rasio kelangsingan batang, tegangan tekuk elastis Euler, tegangan kritis tekan, dan kapasitas tekan izin.

Rumus tegangan tekuk elastis Euler :

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Radius girasi :

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Rasio kelangsingan batang tekan adalah :

$$\frac{KL}{r}$$

Batas pemilihan persamaan tegangan kritis tekan berdasarkan SNI 1729:2020 adalah :

$$\begin{aligned} \frac{KL}{r} &\leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ F_{cr} &= 0,658 F_y \end{aligned}$$

Sedangkan :

$$\begin{aligned} \frac{KL}{r} &> 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ F_{cr} &= 0,877 F_e \end{aligned}$$

Kapasitas tekan nominal :

$$P_n = F_{cr} A_g$$

Kapasitas tekan izin metode ASD :

$$P_a = \frac{P_n}{\Omega_c}$$

Syarat aman elemen tekan :

$$P_{aktual} \leq P_a$$

#### 4.15.1 Data material dan faktor desain

Material yang digunakan adalah ASTM A131 *Grade* AH36 dengan :

$$F_y = 355 \text{ Mpa}$$

$$E = 200.000 \text{ Mpa}$$

Faktor keamanan tekan metode ASD :

$$\Omega_c = 1,67$$

Nilai batas transisi kelangsingan dihitung sebagai :

$$\begin{aligned} &4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ &4,71 \sqrt{\frac{200.000}{355}} \\ &4,71 \sqrt{563,38} \\ &4,71 \times 23,74 \end{aligned}$$

$$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 111,79$$

Nilai digunakan sebagai pembatas untuk memilih rumus  $F_{cr}$

#### 4.15.2 Analisa vertikal leg tanpa intermediate bracing

Pada kondisi awal tanpa intermediate bracing, tinggi efektif vertical leg dianggap sama dengan tinggi batang penuh.

Tabel 4.16 Spesifikasi vertikal leg tanpa *intermediate bracing*

Tinggi vertikal leg	= 4.800 mm
Faktor panjang efektif (k)	= 1,0
Panjang efektif (KL)	= 1,0 × 4.800 = 4.800 mm

Rasio kelangsingan :

$$\frac{KL}{r_{min}} = \frac{4.800}{33,24}$$

$$\frac{KL}{r_{min}} = 144,4$$

Nilai yang didapat masuk ke dalam daerah tekuk elastis, sehingga digunakan :  
144,4 > 111,79

Maka :

$$F_{cr} = 0,877 F_e$$

1. Tegangan tekuk elastis euler :

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times 200.000}{(144,4)^2}$$

$$F_e = 94,6 \text{ MPa}$$

2. Tegangan kritis tekan :

$$\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0,877 F_e$$

$$F_{cr} = 0,877 \times 94,6$$

$$F_{cr} = 83,0 \text{ MPa}$$

3. Kapasitas tekan nominal :

$$P_n = F_{cr} A_g$$

$$P_n = 83,0 \times 2.550$$

$$P_n = 211.650 \text{ N}$$

$$P_n = 211,65 \text{ kN}$$

4. Kapasitas tekan izin :

$$P_n = \frac{P_n}{\Omega_c}$$

$$P_n = \frac{211,65}{1,67}$$

$$P_n = 126,74 \text{ kN}$$

#### 4.15.3 Vertikal leg dengan intermediate bracing

Pada kondisi dengan intermediate X – bracing , panjang efektif vertical leg berkurang karena batang vertikal memperoleh pengekangan lateral di tengah tinggi. Dengan demikian, panjang efektif tekan dapat diambil setengah dari tinggi awal

Tabel 4. 17 Spesifikasi vertikal leg dengan *intermediate bracing*

Panjang efektif baru	= 4.800 / 2 = 2.400 mm
Faktor panjang efektif (k)	= 1,0
Panjang efektif (KL)	= 1,0 × 2.400 = 2.400 mm

Rasio kelangsingan :

$$\frac{KL}{r_{min}} = \frac{2.400}{33,24}$$

$$\frac{KL}{r_{min}} = 72,2$$

Nilai yang didapat masuk ke dalam daerah tekuk inelastis, sehingga digunakan :

$$72,2 < 111,79$$

Maka :

$$F_{cr} = 0,658^{F_y/F_e} F_y$$

1. Tegangan tekuk elastis euler:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times 200.000}{(72,2)^2}$$

$$F_e = 378,67 \text{ MPa}$$

2. Tegangan kristis tekan :

$$\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0,658^{F_y/F_e} F_y$$

$$F_{cr} = 0,658^{F_y/F_e} F_y \times 355$$

$$F_{cr} = 239,78 \text{ MPa}$$

3. Kapasitas tekan nominal :

$$P_n = F_{cr} A_g$$

$$P_n = 239,78 \times 2.550$$

$$P_n = 611.439 \text{ N}$$

$$P_n = 611,44 \text{ kN}$$

4. Kapasitas tekan izin :

$$P_a = \frac{P_n}{\Omega_c}$$

$$P_a = \frac{611,44}{1,67}$$

$$P_a = 366,13 \text{ kN}$$

Nilai kapasitas tekan izin satu vertical leg dengan intermediate X- bracing:

$$P_a \text{ dengan bracing} = 366,13 \text{ kN}$$

#### 4.15.4 Perbandingan kapasitas vertical leg

Kapasitas vertical leg tanpa intermediate bracing :

$$P_a \text{ dengan bracing} = 126,74 \text{ kN}$$

Kapasitas vertical leg dengan intermediate bracing :

$$P_a \text{ dengan bracing} = 366,13 \text{ kN}$$

Peningkatan kapasitas tekan :

$$\Delta P_a = 366,13 - 126,74$$

$$\Delta P_a = 239,39 \text{ kN}$$

Presentase peningkatan :

$$\frac{366,13 - 126,74}{126,74} \times 100 \%$$

$$= 188,9 \%$$

Kapasitas tekan vertical leg meningkat sekita 188,9 %. Dengan demikian intermediate X bracing memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas vertical leg karena mengurangi panjang efektif tekuk dan meningkatkan kapasitas tekan.

#### 4.15.5 Evaluasi beban aksial pada vertical leg

Beban vertikal total sistem adalah :

$$W = 6.461,75 \text{ kN}$$

Beban aksial per vertical leg bergantung pada jumlah leg yang benar- benar bekerja sebagai penunpu efektif. Pada kondisi konservatif diasumsikan seluruh vertical leg berjumlah 42 buah.:

Dengan :

$$P_{leg} = \frac{W}{n}$$

$$= \frac{6461,75}{42}$$

$$= 153,85 \text{ kN}$$

Cek terhadap kapasitas dengan intermediate bracing :

$$P_{leg} = 153,85 \text{ kN}$$

P aksial            Kapasitas tekan izin  
 153,85            < 366,13  
 Nilai aman

#### 4.15.6 Analisis X-Bracing profil C

X bracing menggunakan profil:  
 C 150×75×9×12,5

Elemen X-Bracing bekerja sebagai batang aksial. Pada satu arah pembebanan lateral, salah satu diagonal dapat bekerja tarik, sedangkan diagonal lainnya dapat bekerja tekan. Oleh karena itu, X-bracing diperiksa terhadap kapasitas tarik dan kapasitas tekan/ tekuk.

Tabel 4.18 Dimensional X-Bracing profil C

Luas penampang C ( $A_g$ )	= 3.000 mm <sup>2</sup>
Material AH36 ( $F_y$ )	= 355 Mpa
Faktor keamanan tarik ( $\Omega_t$ )	= 1,67

a. Kapasitas tarik X- Bracing

1. Kapasitas tarik normal :

$$\begin{aligned}
 P_n &= F_y A_g \\
 P_n &= 355 \times 3.000 \\
 P_n &= 1.065.000 \text{ N} \\
 P_n &= 1.065 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

2. Kapasitas tarik izin

$$\begin{aligned}
 P_d &= \frac{P_n}{\Omega_t} \\
 P_d &= \frac{1.065}{1,67} \\
 P_d &= 637,7 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, kapasitas tarik izin satu batang X-bracing profil C adalah :

$$P_d = 637,7 \text{ kN}$$

b. Kapasitas tekan X-Bracing

Untuk batang X-Bracing yang bekerja tekan, pemeriksaan dilakukan terhadap tekuk. Panjang diagonal X-bracing dihitung dari geometri panel

$$L_d = \sqrt{h^2 + s^2}$$

Dimana:

h = tinggi panel bracing  
s = jarak horizontal panel bracing

Maka :

$$\begin{aligned} L_d &= \sqrt{h^2 + s^2} \\ &= \sqrt{5.000^2 + 1.800^2} \\ &= \sqrt{25.000.000 + 3.240.000} \\ &= 5.314 \text{ mm} \end{aligned}$$

Radius girasi minimum profil C berdasarkan pendekatan penampang ideal adalah :

$$r_{\min,C} = 23,47 \text{ mm}$$

Rasio kelangsingan X- bracing tekan :

$$\frac{KL_d}{r_{\min,C}} = \frac{1,0 \times 5.314}{23,47}$$

$$\frac{KL_d}{r_{\min,C}} = 226,44$$

Nilai yang dihasilkan :

$$226,44 > 111,79$$

Maka X-bracing tekan berada pada daerah tekuk elastis, sehingga :

$$F_{cr} = 0,877 F_e$$

1. Tegangan Euler :

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times 200.000}{(226,44)^2}$$

$$F_e = 38,50 \text{ MPa}$$

2. Tegangan kritis tekan

$$F_{cr} = 0,877 F_e$$

$$F_{cr} = 0,877 \times 38,50$$

$$F_{cr} = 33,76 \text{ MPa}$$

3. Kapasitas tekan nominal :

$$P_n = F_{cr} A_g$$

$$P_n = 33,76 \times 3.000$$

$$P_n = 101.280 \text{ N}$$

$$P_n = 101,28 \text{ kN}$$

4. Kapasitas tekan izin :

$$P_d = \frac{P_n}{\Omega_c}$$

$$P_d = \frac{101,28}{1,67}$$

$$P_G = 60,65 \text{ kN}$$

Bedasarkan hasil diatas, X-bracing profil C memiliki kapasitas tekan yang jauh lebih kecil dibanding kapasitas tariknya. Hal ini menunjukkan bahwa X-bracing lebih efektif diperlakukan sebagai elemen tarik, sedangkan batang diagonal yang mengalami tekan tetap perlu diperiksa terhadap tekuk.

#### 4.16 Rekapitulasi hasil evaluasi konfigurasi sistem peluncuran

Dari penelitian yang dilakukan berikut adalah rangkuman teknis hasil penelitian :

Tabel 4.19 Rekapitulasi hasil evaluasi konfigurasi sistem peluncuran

No.	Aspek Evaluasi	Hasil Evaluasi
1.	Objek penelitian	Harbour Tug berlunas tinggi (Lightship 585,691 ton)
2.	Metode peluncuran	<i>Ship Launching Airbag (End Launching)</i>
3.	Standar acuan	CB/T 3837-2011, ISO 17682:2013, BKI, SNI 1729:2020
4.	<i>Material load spreader</i>	ASTM A131 Grade AH36
5.	<i>Dimensi load spreader</i>	26,5 m × 12,4 m
6.	Panjang kontak efektif ( <i>Ld</i> )	Meningkat dari 0,484 m menjadi 12,4 m
7.	Jumlah <i>airbag</i>	Berkurang dari 21 unit menjadi 8 unit aktif + 2 cadangan
8.	Jarak antar <i>airbag</i>	Meningkat dari 1,75 m menjadi 3,79 m dan memenuhi ISO 17682:2013
9.	Verifikasi struktur	Seluruh komponen memenuhi persyaratan BKI dan SNI 1729:2020

Berdasarkan seluruh tahapan perencanaan, perhitungan, dan verifikasi yang telah dilakukan, diperoleh hasil evaluasi terhadap konfigurasi sistem peluncuran kapal *harbour tug* berlunas tinggi menggunakan metode *ship launching airbag* dengan penambahan *load spreader*. Evaluasi dilakukan terhadap parameter utama yang meliputi konfigurasi *airbag*, distribusi beban, kapasitas dukung *airbag*, kekuatan struktur *load spreader*, serta pemenuhan standar teknis yang digunakan dalam penelitian. Ringkasan hasil evaluasi tersebut disajikan pada Tabel 4.21

Tabel 4.21 menunjukkan bahwa penambahan *load spreader* memberikan peningkatan kinerja sistem peluncuran secara menyeluruh. Hal tersebut ditunjukkan dengan meningkatnya panjang kontak efektif (*Ld*), berkurangnya jumlah *airbag* yang dibutuhkan, terpenuhinya jarak antar *airbag* sesuai ketentuan ISO 17682:2013, serta tercapainya faktor keamanan sistem *airbag* yang memenuhi persyaratan. Selain itu, hasil verifikasi struktur menunjukkan bahwa seluruh komponen *load spreader* memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan BKI dan SNI 1729:2020, sehingga mampu menahan beban peluncuran dengan aman.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa konfigurasi sistem peluncuran yang dirancang telah memenuhi parameter teknis dan persyaratan keselamatan yang ditetapkan dalam standar CB/T 3837, ISO 17682:2013, dan SNI 1729:2020. Oleh karena itu, konfigurasi tersebut dinilai layak diterapkan sebagai alternatif sistem peluncuran kapal *harbour tug* berlunas tinggi pada galangan kapal yang memiliki keterbatasan fasilitas peluncuran