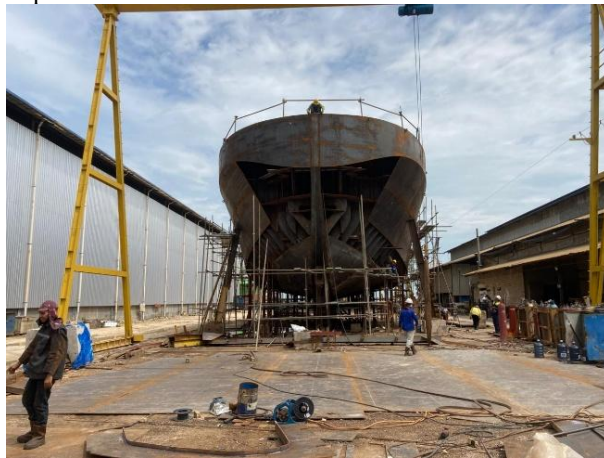


BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 *Harbour tug*

Kapal *tugboat* merupakan armada penunjang yang dirancang khusus untuk memfasilitasi olah gerak kapal lain di berbagai wilayah perairan dengan mengandalkan daya tarik tinggi melalui konfigurasi dua mesin induk, menurut (Wahyudi et al., 2024) umumnya memiliki kapasitas antara 500 hingga 2.500 kW bahkan mencapai 20.000 kW untuk operasional di laut dalam. Secara spesifik, *harbour tug* berperan vital sebagai asisten dalam proses penyandaran (*mooring*) dan lepas sandar (*unmooring*) bagi kapal-kapal berukuran besar di pelabuhan yang memiliki keterbatasan manuver akibat ketiadaan *bow thruster*. Oleh karena itu, besarnya spesifikasi daya mesin pada tugboat menjadi syarat mutlak untuk memastikan kelancaran operasional serta keamanan pergerakan kapal-kapal raksasa tersebut selama berada di area pelabuhan.



Gambar 2.1 *Harbour tug*
Sumber: Dokumen pribadi

Kapal *harbour tug* adalah jenis kapal bantu yang dirancang khusus untuk operasi di daerah pelabuhan dan perairan dangkal, serta memiliki peran yang amat penting dalam membantu manuver kapal besar yang ada seperti untuk *docking*, *undocking* dan pengaturan posisi kapal saat berada di pelabuhan atau dermaga. Kapal *harbour tug* memiliki desain kompleks, manuver yang tinggi, dan kapasitas *bollard pull* yang besar, meskipun memiliki ukuran yang relatif kecil jika dibandingkan dengan kapal yang dibantu, sehingga mampu memberikan daya dorongan maupun tarikan yang efektif pada kapal induk dalam ruang yang terbatas (Fikhriet al., 2012). Selain itu, *harbour tug* juga dilengkapi dengan sistem fender yang kuat serta desain lambung dan fender yang diperkuat untuk menahan kontak berulang dengan struktur besar seperti haluan kapal induk maupun dermaga, suatu karakteristik fungsional yang esensial dalam operasi pelabuhan.

Dalam bentuk lunas yang ada, *harbour tug* sering kali memiliki lunas yang berbeda dibanding kapal laut lepas, terkadang berupa lunas yang lebih tinggi atau kontur lambung khusus untuk meningkatkan respons *bollard pull* dan stabilitas saat melakukan tarikan atau dorongan berat dalam kondisi tenang. Karakteristik ini berimplikasi pada distribusi beban vertikal yang lebih menonjol di bagian lunas, sehingga pengaruhnya terhadap fase peluncuran kapal harus dianalisis secara cermat guna menghindari konsentrasi beban lokal yang terlalu tinggi. Kajian ilmiah yang dilakukan oleh (Wahyudi et al., 2024) menunjukkan bahwa dalam desain dan analisis kapal tunda seperti *harbour tug*, stabilitas, gaya tarik, serta distribusi beban merupakan aspek penting yang memengaruhi performa operasional dan keselamatan

kapal, khususnya dalam fase transisi seperti launching atau saat operasi kerja berat di pelabuhan.

2.2 Lunas kapal (*keel*)

Lunas atau *keel* merupakan elemen struktur utama kapal yang terletak memanjang pada bagian dasar kapal dan membentang dari bagian haluan hingga buritan. Dalam kajian keteknikan perkapalan, lunas berfungsi sebagai komponen utama penopang kekuatan memanjang struktur kapal, pengikat dan penguat kedua sisi lambung, serta berperan dalam menjaga kestabilan arah pelayaran dan meningkatkan momen pengembalian kapal ketika mengalami kemiringan (Alie et al., 2025). Selain aspek kekuatan struktural, desain keel juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja hidrodinamik kapal, khususnya dalam kondisi operasional yang menantang. Geometri dan dimensi keel berperan dalam meningkatkan ketahanan kapal terhadap gerakan berguling, yang menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas saat kapal menghadapi gelombang tinggi maupun arus kuat. Integrasi elemen tambahan seperti *bilge keel* berfungsi sebagai perangkat peredam gerakan berguling dengan meningkatkan koefisien redaman hidrodinamik, sehingga amplitudo olah gerak kapal dapat dikurangi secara efektif. Dengan demikian, pemahaman yang komprehensif terhadap desain dan fungsi keel tidak hanya mendukung optimasi kekuatan struktur kapal, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan keselamatan awak, muatan, serta kinerja kapal dalam berbagai kondisi operasional.

2.3 Proses *undocking (launching)* kapal

Proses *undocking* atau launching kapal adalah fase kritis dalam rangkaian produksi kapal yang menandai perpindahan badan kapal dari daratan ke perairan, dan umumnya melibatkan pengaturan distribusi beban dan momen kapal agar transisi tersebut berjalan aman dan terkendali (Abdullah & Sarena, 2024). Peluncuran kapal dapat dilakukan dengan berbagai metode konvensional seperti *slipway* atau *gravitational launching*, maupun dengan alternatif modern seperti *ship launching airbag* yang semakin banyak diterapkan di galangan kapal karena memberikan fleksibilitas lokasi dan efisiensi biaya dibandingkan penggunaan *slipway* tradisional (Hendra Gonawan et al., 2023). Penggunaan *airbag* pada metode peluncuran ini bekerja dengan mengubah gaya gesek tradisional menjadi gaya rolling, sehingga kapal dapat bergerak lebih halus sepanjang permukaan tumpuan dan meminimalkan risiko kerusakan pada struktur kapal dan media peluncur.

Penelitian oleh (Abdullah & Sarena, 2024) juga menunjukkan bahwa meskipun *airbag* merupakan metode yang efektif, peluncuran kapal menggunakan *airbag* memiliki sejumlah tantangan operasional dan teknis yang harus dianalisis secara matang, termasuk kecenderungan gerakan kapal di berbagai kondisi operasi peluncuran, efek tekanan internal *airbag* terhadap struktur kapal, serta risiko keselamatan yang terkait dengan stabilitas kapal saat memasuki fase kritis peluncuran. Misalnya, analisis risiko peluncuran menggunakan *Functional Resonance Accident Model* menunjukkan bahwa operasi peluncuran kapal dengan *airbag* dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk resistensi gerak, kekurangan stabilitas, dan kemungkinan terjadinya interaksi yang tidak diantisipasi antara manusia, teknologi, dan metode peluncuran itu sendiri (Abdullah & Sarena, 2024).

Tahap tahap yang dilakukan dalam peluncuran kapal adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan peluncuran
2. Perencanaan perlengkapan peluncuran
3. Pemasangan perlengkapan peluncuran
4. Pindahan badan kapal dari keel block ke peluncur
5. Pindahan badan kapal dari tumpuan peluncur ke peluncur
6. Pelaksanaan peluncuran

Dalam proses peluncuran kapal, digunakan perangkat peluncur yang terdiri atas jalan peluncur (*launching ways*) dan media peluncur. Media peluncur ini dipasang pada badan

kapal sehingga kapal dapat bergerak meluncur di atas jalan peluncur saat proses peluncuran berlangsung. Pemilihan sistem peluncuran sangat bergantung pada fasilitas yang dimiliki oleh galangan kapal. Secara umum, metode peluncuran kapal diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu :

1. Peluncuran memanjang (*end launching*)
2. Peluncuran melintang (*side launching*)

Metode yang paling sering digunakan adalah peluncuran memanjang atau *longitudinal launching*. Sementara itu, peluncuran melintang biasanya diterapkan dalam kondisi tertentu yang bersifat terbatas, seperti ketika area perairan di depan landasan sempit, misalnya di sungai atau terusan. Peluncuran memanjang termasuk ke dalam jenis peluncuran berbasis gaya gravitasi, di mana kapal diarahkan dengan buritan menghadap ke perairan sehingga bagian buritan menyentuh air terlebih dahulu. Metode ini dikenal sebagai *end launching*. Konsep tersebut diterapkan dengan tujuan untuk mencegah benturan linggi buritan dengan landasan, menurunkan kecepatan luncur kapal pada saat kontak awal dengan air, serta mempercepat timbulnya gaya angkat ke atas selama proses peluncuran.

Keunggulan utama dari metode *end launching* terletak pada penggunaan peralatan yang relatif sederhana serta fleksibilitasnya untuk diaplikasikan pada berbagai jenis dan ukuran kapal, termasuk kapal dengan tonase yang berbeda-beda.

2.4 Spesifikasi dan perhitungan *airbag* sesuai dengan C/BT 3837-2011

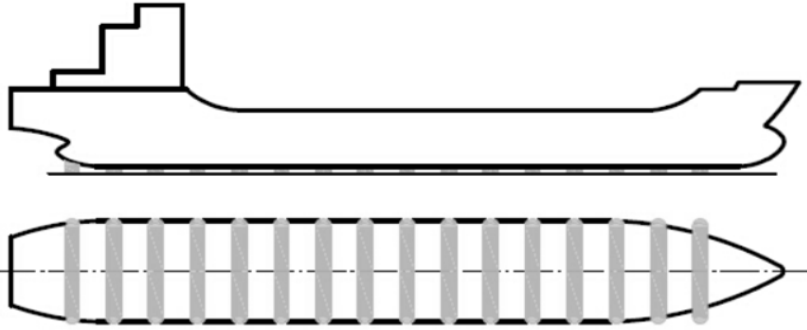
Standar CB/T 3837 merupakan standar teknis yang dikeluarkan oleh *China Classification Society (CCS)* yang mengatur persyaratan desain, spesifikasi teknis, serta tata cara penggunaan *ship launching airbag* pada proses peluncuran kapal. Standar ini banyak digunakan secara internasional, khususnya pada galangan kapal dengan keterbatasan fasilitas *slipway* atau *dry dock* konvensional. Ruang lingkup standar CB/T 3837 mencakup ketentuan mengenai karakteristik *airbag*, konfigurasi penempatan *airbag*, tekanan kerja yang diizinkan, serta faktor keselamatan yang harus dipenuhi selama proses peluncuran kapal. Standar ini dirancang untuk memastikan bahwa proses *launching* dapat dilakukan secara aman, terkendali, dan efisien, tanpa menimbulkan kerusakan struktural pada kapal maupun kegagalan pada *airbag*.

Airbag terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu *mouth*, *head*, dan *body*, yang memiliki peran spesifik masing-masing dalam keseluruhan struktur *airbag*. Untuk memastikan perhitungan yang digunakan dalam perhitungan *airbag* akurat, diperlukan data spesifikasi teknis *airbag* yang digunakan selama peluncuran meliputi diameter, jumlah lapisan, berat, serta nilai kekuatan dari *airbag* yang dipakai. *Airbag* memiliki kriteria dalam penggunaan yang aman yang diatur dalam CB/T diantaranya tekanan udara di dalam kantong udara tidak boleh melebihi batas aman kebocoran, beban yang dibawa oleh kantong udara tidak boleh memiliki permukaan yang tajam atau tidak rata, hindari benturan keras pada kantong udara.

2.4.1 Tipe layout *airbag*

Pemilihan tipe *layout airbag* yang tepat bergantung pada spesifikasi ukuran *airbag* dan lebar kapal. Beberapa tipe *layout* yang umumnya digunakan dalam peluncuran kapal dengan *airbag* meliputi *single row arrangement*, *cross over arrangement*, dan *two row arrangement* (Dzulfiqar et al., 2024)

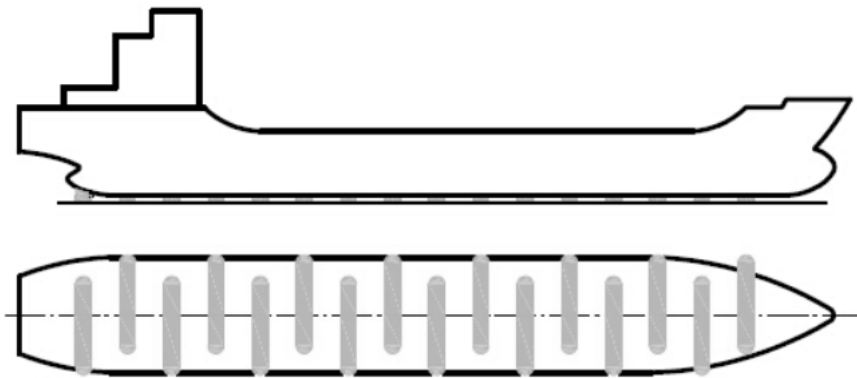
1. *Layout single row arrangement*



Gambar 2.2 *Layout Single Row Arrangement*

Layout single row arrangement diterapkan ketika panjang *airbag* lebih panjang dari lebar kapal, dimana *airbag* diposisikan secara seimbang dan sesuai dengan garis tengah kapal untuk menjaga stabilitas.

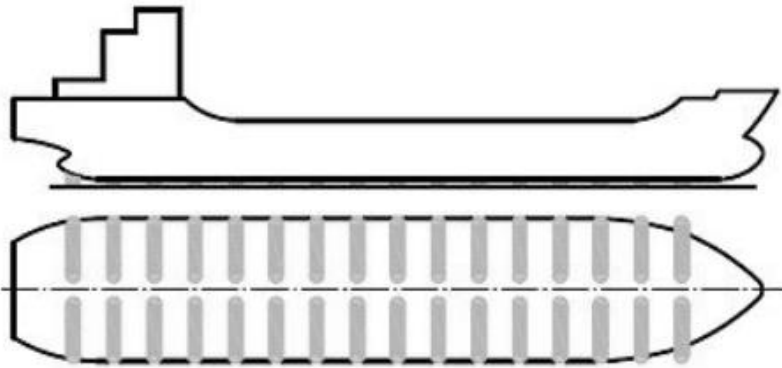
2. *Layout cross over arrangement*



Gambar 2.3 *Layout Over Arrangement*

Layout cross over arrangement digunakan apabila panjang *airbag* lebih pendek dari lebar kapal atau lebih dari setengah lebar kapal, dengan posisi *airbag* disilang (*cross over*) untuk memastikan distribusi beban yang merata di sepanjang lambung kapal.

3. *Layout two row arrangement*



Gambar 2.4 Layout Two Row Arrangement

Layout two row arrangement diterapkan ketika panjang airbag lebih pendek dari setengah lebar kapal, dimana airbag diatur dalam dua baris untuk menjaga distribusi beban yang optimal dan stabilitas kapal

2.4.2 Spesifikasi airbag

Spesifikasi airbag berdasarkan diameter dan jumlah lapisan (Yusim et al., 2021) :

Tabel 2.1 Spesifikasi airbag

| D (m) | Tekanan Menengah (4–5 lapisan) | | Tekanan Tinggi (6–8 lapisan) | |
|-------|--------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| | Tp (MPa) | Wp (MPa) | Tp (MPa) | Wp (MPa) |
| 1,0 | 0,14 – 0,16 | 0,12 – 0,14 | 0,22 – 0,26 | 0,20 – 0,24 |
| 1,2 | 0,12 – 0,14 | 0,10 – 0,12 | 0,20 – 0,24 | 0,17 – 0,22 |
| 1,5 | 0,10 – 0,12 | 0,08 – 0,10 | 0,15 – 0,20 | 0,13 – 0,18 |
| 1,8 | 0,08 – 0,10 | 0,07 – 0,09 | 0,13 – 0,16 | 0,11 – 0,14 |
| 2,0 | 0,07 – 0,09 | 0,06 – 0,08 | 0,12 – 0,15 | 0,10 – 0,13 |

Selain mempunyai bentuk dan lapisan, airbag juga mempunyai berat :

Tabel 2.2 Spesifikasi airbag

| Berat airbag | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Panjang (m) | D = 0,8 m | D = 1,0 m | D = 1,2 m | D = 1,5 m | D = 1,8 m | D = 2,0 m |
| 5 | 107 kg | 138 kg | 171 kg | 223 kg | 281 kg | 321 kg |
| 6 | 125 kg | 161 kg | 198 kg | 258 kg | 322 kg | 367 kg |
| 7 | 143 kg | 184 kg | 226 kg | 292 kg | 363 kg | 412 kg |
| 8 | 161 kg | 206 kg | 253 kg | 326 kg | 404 kg | 458 kg |
| 9 | 180 kg | 229 kg | 280 kg | 361 kg | 445 kg | 504 kg |
| 10 | 198 kg | 252 kg | 308 kg | 395 kg | 486 kg | 550 kg |
| 11 | 216 kg | 275 kg | 335 kg | 429 kg | 527 kg | 596 kg |
| 12 | 234 kg | 298 kg | 362 kg | 463 kg | 568 kg | 642 kg |
| 13 | 252 kg | 321 kg | 389 kg | 497 kg | 609 kg | 688 kg |
| 14 | 270 kg | 344 kg | 416 kg | 531 kg | 650 kg | 734 kg |
| 15 | 288 kg | 367 kg | 443 kg | 565 kg | 691 kg | 780 kg |
| 16 | 306 kg | 390 kg | 470 kg | 599 kg | 732 kg | 826 kg |
| 17 | 324 kg | 413 kg | 497 kg | 633 kg | 773 kg | 872 kg |
| 18 | 342 kg | 436 kg | 524 kg | 667 kg | 814 kg | 918 kg |

2.4.3 Rumus perhitungan jumlah *airbag*

Dalam perhitungan jumlah *airbag* diperlukan ukuran utama kapal dan spesifikasi *airbag*. Setelah data utama dan spesifikasi *airbag* didapatkan, analisa perhitungan jumlah *airbag* dapat dilakukan. Perhitungan jumlah *airbag* yang dipakai berdasarkan C/B T 3837 *Shipbuilding Industry Standard*. Untuk kapal konvensional, jumlah *airbag* dapat dihitung menggunakan rumus :

$$N = K_1 + \frac{Q \cdot g}{C_b \cdot R \cdot L_d} + N_1$$

Dimana :

- N = Jumlah *airbags* (pcs)
- K₁ = Nilai konstanta 1,2~1,3
- Q = Berat kapal yang akan diluncurkan (ton)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- 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)
- N₁ = Jumlah *airbag* yang diganti terus menerus biasanya dibutuhkan 2~4

2.4.4 Rumus penentuan jarak antar *airbag*

Dalam penentuan jarak antar *airbag* yang akan dipakai, perhitungan jumlah harus sudah dilakukan dengan tepat karena, untuk mendapatkan hasil jarak antara *airbag* diperlukan data kapal, spesifikasi *airbag* dan jumlah *airbag* yang digunakan. Berdasarkan C/B T 3837 *shipbuilding industry standard*, perhitungan jarak antara *airbag* dapat dihitung menggunakan rumus :

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

Dimana :

- L = Panjang lunas kapal (m)
- N = Jumlah *airbag* (pcs)
- D = Diameter *airbag* (pcs)

2.5 Material AH36

Higher strenght hull structural steel Grade AH36 atau ASTM A131 *Grade AH36* merupakan baja struktural berkekuatan tinggi yang dirancang untuk aplikasi perkapalan dan struktur kelautan. Material ini memiliki kekuatan luluh minimum sebesar 355 MPa serta kekuatan tarik ultimit pada kisaran 490–620 MPa, sehingga sesuai digunakan pada elemen struktur yang menerima pembebanan besar dan memerlukan ketangguhan yang baik (Vukelic et al., 2021).

2.5.1 Sifat mekanik

Tabel 2.3 Sifat material AH36

| No. | Properti Material | Simbol | Nilai |
|-----|-------------------------|--------------------|---------|
| 1 | Tegangan luluh minimum | F _y | 355 MPa |
| 2 | Kekuatan tarik minimum | R _{m,min} | 490 MPa |
| 3 | Kekuatan tarik maksimum | R _{m,max} | 620 MPa |

| | | | |
|----|--|------------------|-------------------------|
| 4 | Modulus elastisitas | E | 200.000 MPa |
| 5 | Modulus geser | G | 77.200 MPa |
| 6 | Koefisien Poisson | ν | 0,30 |
| 7 | Densitas baja | ρ_s | 7.850 kg/m ³ |
| 8 | Faktor material BKI | k | 0,72 |
| 9 | Tegangan ijin lentur ($F_y/1,67$) | $\sigma_{b,all}$ | 212,6 MPa |
| 10 | Tegangan ijin tekan ($0,6 \cdot F_y$) | $\sigma_{c,all}$ | 213,0 MPa |
| 11 | Tegangan ijin geser ($0,4 \cdot F_y$) | τ_{all} | 142,0 MPa |

2.6 Rekayasa distribusi beban dan penambahan plat baja sementara pada keel

Pada proses *undocking (launching)* kapal menggunakan *ship launching airbag*, distribusi beban yang tidak merata dapat menyebabkan konsentrasi tegangan berlebih pada titik kontak antara lambung kapal dan *airbag*. Kondisi ini menjadi lebih kritis pada kapal *harbour tug* yang memiliki profil lunas tinggi, karena luas bidang kontak lunas terhadap *airbag* relatif kecil dibandingkan berat kapal, sehingga berpotensi meningkatkan tekanan kontak lokal dan risiko kegagalan *airbag*. Oleh karena itu, diperlukan rekayasa distribusi beban agar gaya tekan dari berat kapal dapat disebarakan secara lebih merata sepanjang garis tumpuan saat proses peluncuran.

Salah satu metode rekayasa distribusi beban yang dapat diterapkan adalah penambahan plat baja sementara pada bagian keel. Plat baja ini dipasang memanjang sepanjang *keel* kapal dengan lebar yang mendekati lebar lambung di area bawah, sehingga berfungsi sebagai *load spreader* untuk memperbesar luas bidang kontak antara struktur kapal dan *airbag*. Prinsip ini sejalan dengan konsep mekanika struktur, di mana peningkatan luas kontak akan menurunkan tegangan kontak (*contact stress*) yang diterima oleh bantalan elastis seperti *airbag* (Gere & Timoshenko, 2019).

2.7 Regangan

Regangan (*strain*) merupakan ukuran deformasi relatif yang dialami oleh material akibat tegangan yang bekerja. Regangan menunjukkan perubahan bentuk atau panjang suatu elemen struktur terhadap dimensi awalnya, dan secara langsung berkaitan dengan perilaku elastis maupun plastis material. Dalam analisis struktur kapal, regangan digunakan untuk mengidentifikasi sejauh mana deformasi yang terjadi masih berada dalam batas elastis yang dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan (Ricardo Hasian Siagian et al., 2015).

Pada sistem launching berbasis *airbag*, regangan tidak hanya terjadi pada struktur baja kapal, tetapi juga berkaitan dengan respons deformasi global akibat interaksi antara kapal, plat baja sementara, dan *airbag* sebagai tumpuan elastis. Evaluasi regangan menjadi penting untuk memastikan bahwa deformasi yang terjadi selama proses *undocking* tidak mengganggu integritas struktur lunas maupun kestabilan kapal secara keseluruhan.

2.8 Tegangan

Tegangan (*stress*) merupakan besaran mekanika yang menyatakan intensitas gaya internal yang timbul pada suatu material akibat pembebanan eksternal (Alie & Latumahina, 2019). Dalam struktur kapal, tegangan muncul sebagai respons terhadap gaya berat kapal, gaya reaksi tumpuan, serta tekanan kontak yang terjadi selama kondisi operasi normal maupun kondisi sementara, seperti pada proses peluncuran kapal (*launching*) (Liu & Yu,

2022). Tegangan menjadi parameter utama dalam evaluasi kekuatan struktur karena secara langsung berkaitan dengan batas kemampuan material dalam menahan beban tanpa mengalami kegagalan.

Pada proses *launching* kapal menggunakan *ship launching airbag*, beban kapal tidak didistribusikan secara merata sepanjang dasar lambung (Hendra Gonawan et al., 2023c). Kondisi ini terutama terjadi pada kapal dengan profil lunas tinggi, di mana bidang kontak antara lunas kapal dan *airbag* relatif sempit. Akibatnya, gaya reaksi *airbag* terfokus pada area tertentu sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan lokal yang tinggi pada struktur lunas dan pelat dasar kapal. Konsentrasi tegangan tersebut berpotensi menyebabkan deformasi lokal, retak, atau bahkan kegagalan struktur apabila melebihi tegangan izin material (Dong et al., 2024). Untuk mengurangi konsentrasi tegangan tersebut, digunakan plat baja sementara (*load spreader*) yang ditempatkan di antara struktur lunas kapal dan *airbag*. Plat baja sementara berfungsi untuk memperbesar luas bidang kontak antara kapal dan *airbag* sehingga gaya reaksi yang diterima struktur kapal dapat terdistribusi lebih merata. Dengan bertambahnya luas kontak, nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur lunas dan pelat dasar kapal diharapkan mengalami penurunan secara signifikan.

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Dimana :

σ = Tegangan normal (Pa atau Mpa)

ΔF = Gaya Normal yang bekerja (N)