

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

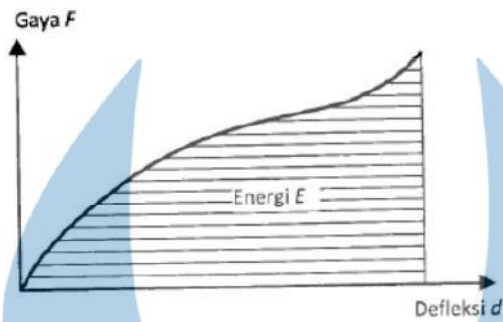
2.1 Dasar Teori

2.1.1 *Fender*

Fender merupakan struktur yang dipasang di sepanjang sisi dermaga dengan tujuan melindungi dermaga dari benturan kapal. Fungsinya terutama adalah menyerap energi saat terjadi tumbukan ketika kapal bersandar di dermaga, lalu mengalihkan energi tersebut menjadi deformasi pada struktur dermaga (Zulkifli, 2012).

Fender berperan sebagai pelindung utama di depan dermaga, dengan fungsi menyerap energi tumbukan antara kapal dan dermaga serta menyalurkan gaya tersebut ke struktur dermaga. Jenis *fender* dan tingkat defleksi yang diizinkan akan memengaruhi besarnya gaya yang diteruskan. Selain itu, *fender* juga berfungsi untuk mencegah kerusakan pada lapisan cat kapal akibat gesekan yang ditimbulkan oleh pergerakan kapal terhadap dermaga, yang disebabkan oleh arus, gelombang, dan angin (Triatmodjo, 2010).

Fender harus memiliki keandalan tinggi untuk melindungi kapal, struktur dermaga. *Fender* dirancang agar dapat berfungsi setiap hari dalam jangka waktu bertahun-tahun, meskipun berada di lingkungan ekstrem dan dengan perawatan minimal atau bahkan tanpa perawatan sama sekali. Oleh sebab itu, diperlukan desain *fender* yang optimal untuk memastikan kinerja maksimalnya (Trelleborg Marine System, 2007).



Gambar 2.1 Kurva Pemampatan-gaya pada *fender*

(Sumber: Bambang Triadmojo 2010)

Fender yang terbuat dari bahan elastis, seperti *fender* karet, biasanya dipasang di depan dermaga dan terdiri dari beberapa unit. Produk *fender* karet buatan pabrik semakin banyak digunakan karena memiliki kemampuan penyerapan energi benturan yang baik, kualitas yang lebih unggul, serta tersedia dalam berbagai tipe dan ukuran di pasaran (Shibata, 2021). Adapun beberapa contoh *fender* antara lain:

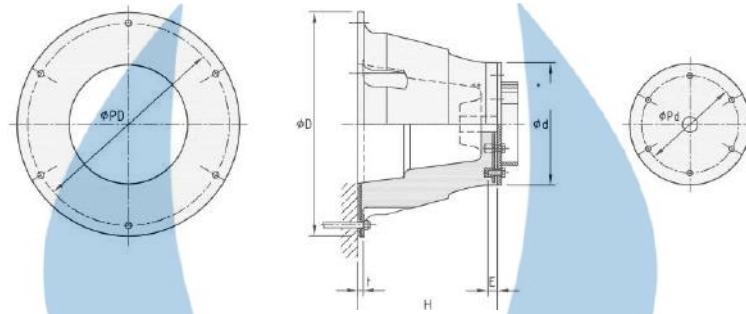
1. *Fender* tipe SPC Cone

Fender tipe SPC (*Super Cone Fender*) merupakan jenis *fender* karet berbentuk kerucut yang dirancang untuk mencapai kinerja maksimal dalam menyerap energi benturan dan mengurangi gaya reaksi. *Fender* ini banyak diaplikasikan di dermaga karena keunggulannya dalam hal daya tahan, stabilitas, serta kemampuannya untuk menyesuaikan dengan berbagai ukuran kapal (Shibata, 2021).



Gambar 2. 2 SPC Cone *Fender*

(Sumber : Catalog Shibata *fender* team 2021)



Gambar 2. 3 Dimensi *Fender SPC Cone*

(Sumber : Catalog Shibata *fender* team 2021)

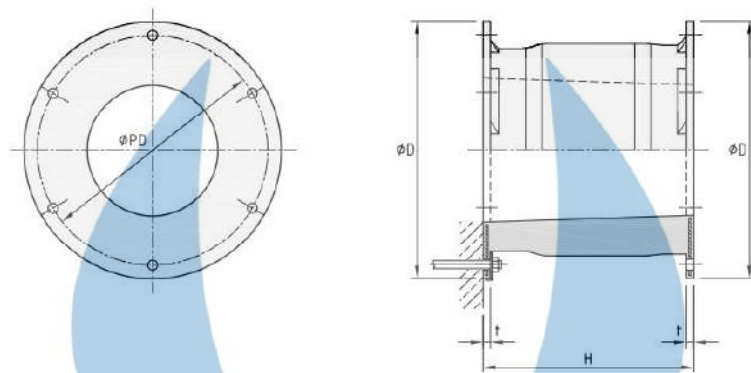
2. *Fender Tipe Cell*

Fender tipe cell merupakan *fender* karet berbentuk silinder yang dirancang untuk menyerap energi benturan secara optimal dengan gaya reaksi yang terkontrol. Jenis *fender* ini memiliki kestabilan tinggi, daya tahan yang baik, dan sesuai untuk berbagai kebutuhan dermaga, seperti terminal peti kemas, pelabuhan minyak, maupun dermaga kapal besar. Dengan material berkualitas dan pemasangan yang fleksibel, *fender* ini efektif melindungi kapal serta struktur dermaga (Shibata, 2021).



Gambar 2. 4 *Cell fender*

(Sumber : Catalog Shibata *fender* team 2021)



Gambar 2. 5 Dimensi *Fender Cell*

(Sumber : Catalog Shibata *fender team* 2021)

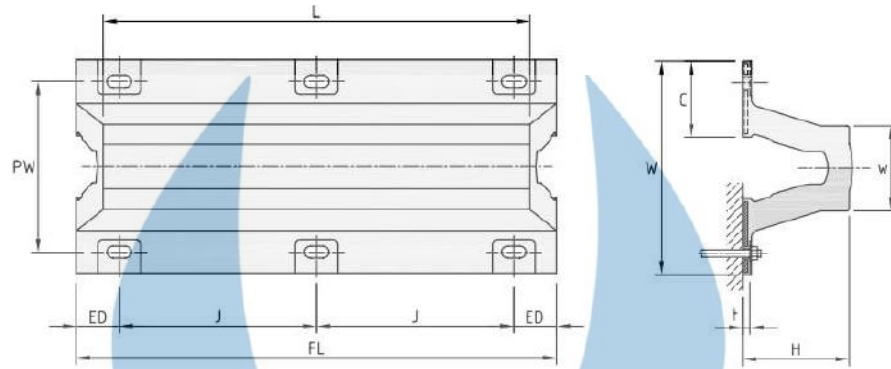
3. *Fender Tipe V*

Fender tipe V merupakan *fender* karet berbentuk huruf "V" yang dirancang untuk menyerap energi benturan secara efektif, ideal untuk dermaga dengan beban ringan hingga sedang. Dengan desain yang ringkas, fleksibel, dan mudah dipasang, *fender ini* sangat cocok untuk melindungi dermaga kapal kecil hingga menengah. Terbuat dari material berkualitas tinggi, *fender ini* banyak diaplikasikan pada pelabuhan perikanan, dermaga kapal penumpang kecil, dan berbagai struktur pelabuhan lainnya (Shibata, 2021).



Gambar 2. 6 *Fender V*

(Sumber : Catalog Shibata *fender team* 2021)



Gambar 2. 7 Dimensi *Fender V*

(Sumber : Catalog Shibata *fender team*)

Menurut PIANC WG 33 (2002), instalasi *fender* elastomerik seperti tipe V harus memperhatikan orientasi pemasangan agar sejajar dengan arah gaya kapal. Pada bab 6.5 dijelaskan pentingnya kelurusan, jarak antar fender, serta penggunaan anchor yang kuat untuk menahan gaya benturan. Selain itu, pada lampiran A dijabarkan spesifikasi *fender* padat termasuk arah pemasangan dan dimensi. Meskipun tipe V tidak disebutkan secara khusus, prinsip-prinsip ini berlaku umum untuk semua *fender* elastomerik agar kinerja penyerap energinya optimal.

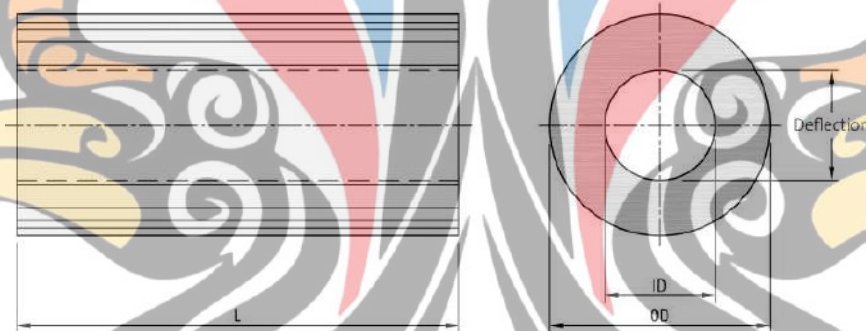
4. *Fender Tipe Cylindrical*

Fender tipe cylindrical adalah *fender* karet berbentuk silinder yang dirancang untuk efektif dalam menyerap energi benturan. Dengan desain yang sederhana dan fleksibel, *fender* ini cocok digunakan pada berbagai jenis dermaga dan kapal. Dibuat dari material yang tahan lama, *fender* tipe *cylindrical* mudah dipasang dan banyak digunakan di pelabuhan kecil, tambatan kapal, serta dermaga terapung. Keunggulannya termasuk biaya yang efisien dan kemampuan menyerap energi benturan dengan baik, menjadikannya pilihan yang banyak dipilih untuk melindungi dermaga (Shibata, 2021).



Gambar 2. 8 *Fender Cylindrical*

(Sumber : Catalog Shibata *fender* team 2021)



Gambar 2. 9 Dimensi *Fender Cylindrical*

(Sumber : Catalog Shibata *fender* team 2021)

2.1.2 Panel *Fender*

Pada *fender* existing terdapat struktur pelindung permukaan *fender* dengan menggunakan material plat baja ASTM A36. Panel *fender* dibuat dengan sistem “closed box”, sistem desain ini memiliki kekuatan tinggi untuk rasio berat dan menciptakan bentuk eksterior sederhana yang mudah untuk melapisi dan memeliharanya. Bagian dalam panel ini diuji tekan untuk memastikan sepenuhnya tertutup dari lingkungan dan masuknya air. Adapun kriteria baja yang digunakan pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Kriteria Baja Panel

Standar	Grade	Yield Strength		Tensile Strength		Temperature	
		N/mm ²	Psi	N/mm ²	Psi	Celcius	Farenheit
ASTM	A-36	250	36.000	400	58.000	0	32

2.1.3 Berthing Energy (E_n)

Saat kapal berlabuh di pelabuhan, kapal akan mengalirkan energi ke bangunan dermaga. Energi benturan dari kapal diserap oleh *fender*, yang selanjutnya mentransfer energi itu ke struktur dermaga dan menyebabkan reaksi pada struktur tersebut. Energi yang ditransfer oleh kapal besar dapat mengakibatkan defleksi pada *fender*. Perhitungan energi sandar kapal mirip dengan perhitungan energi kinetik, namun disertai beberapa koefisien tambahan. Energi sandar kapal dapat dihitung menggunakan beberapa rumus tertentu (PIANC, 2002) antara lain:

$$E_N = 0,5 \times M \times V^2 \times CM \times CE \times CC \times CS \quad (2.1)$$

Dimana :

- E_N = Energi sandar kapal (kNm)
- M = Berat Kapal (displacement tonnage)
- V^2 = Komponen kecepatan kapal saat merapat dalam arah tegak lurus (m/s)
- CM = Koefisien *added mass*
- CE = Koefisien eksentrisitas
- CC = Koefisien konfigurasi *berthing*
- CS = Koefisien *softness*

PIANC menyarankan nilai *confidence limit* sebesar 50% atau 75% (M50 atau M75) sesuai untuk kebanyakan kasus. V_B biasanya didasarkan pada *displacement* sebesar 50% *confidence limit* (M50).

2.1.4 Berthing Force

Gaya *berthing* adalah gaya yang terjadi ketika kapal melakukan manuver

sandar dan mengenai sistem *fender* pada dermaga. Gaya ini berasal dari energi kinetik kapal yang diserap oleh *fender* dalam bentuk deformasi. Untuk keperluan simulasi numerik, seperti pada *software ansys*, gaya ini dapat dihitung menggunakan rumus:

$$F = \frac{E_{Berth}}{E_{Absorp}} \times R \quad (2.2)$$

Dimana:

F = Gaya *berthing*

E_{Bert} = Energi *berthing*

E_{Absorp} = Energi serap *fender*

R = Reaksi maksimum *fender*

rumus ini merupakan bentuk penyederhanaan, pendekatan tersebut sesuai dengan prinsip konservasi energi dan direkomendasikan dalam panduan teknis seperti PIANC untuk estimasi awal dalam analisis desain dan numerik.

2.1.5 *Abnormal Berthing Energy*

Dampak tidak normal terjadi ketika energi sandar normal terlampaui. *Abnormal berthing energy* dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti kesalahan manusia, kerusakan alat, kondisi cuaca ekstrem, atau kombinasi dari faktor-faktor tersebut. Pencarian nilai *abnormal berthing* memiliki peran penting dalam perancangan dan evaluasi sistem *fender* serta struktur dermaga. Nilai ini merepresentasikan kondisi ekstrem yang mungkin terjadi selama proses sandar kapal, seperti kegagalan sistem navigasi, kesalahan manuver, atau pengaruh cuaca buruk. Dengan mengetahui nilai abnormal ini, perancang dapat memastikan bahwa sistem *fender* dan struktur dermaga mampu menahan beban di luar kondisi operasional normal tanpa mengalami kerusakan fatal. Nilai ini juga digunakan sebagai acuan dalam penerapan faktor keamanan tambahan dan evaluasi risiko. Dalam beberapa standar seperti PIANC, nilai abnormal *berthing* dihitung sebagai kelipatan dari energi normal, sehingga *fender* dan struktur pelabuhan dirancang tidak hanya untuk kondisi rutin, tetapi juga siap menghadapi skenario terburuk yang mungkin terjadi di lapangan. Energi sandar yang tidak normal dan diserap oleh *fender* dapat dihitung menggunakan rumus (PIANC, 2002):

$$EA = FS \times EN \quad (2.3)$$

Dimana:

EA = Energi sandar kapal abnormal yang diserap kapal (kNm)

FS = *Safety factor* untuk *abnormal berthing energy*

EN = *Berthing energy*

Penentuan safety factor bergantung pada banyak faktor, antara lain adalah (PIANC, 2002):

- Konsekuensi kemungkinan kegagalan *fender* saat kapal bersandar
- Seberapa sering berthing digunakan
- *Design berthing speed* yang sangat rendah
- Kerentanan terhadap kerusakan struktur pendukung
- Jenis dan ukuran kapal yang bersandar

Tabel 2. 2 Safety Factor (FS) (PIANC, 2002)

Jenis Kapal	Ukuran	Fs
<i>Tanker, Bulk, Cargo</i>	Terbesar	1,25
	Terkecil	1,75
<i>Container</i>	Terbesar	1,5
	Terkecil	2,0
<i>General Cargo</i>		1,75
<i>RoRo, Ferries</i>		$\geq 2,0$
<i>Tugs, Workboat, dll</i>		2,0

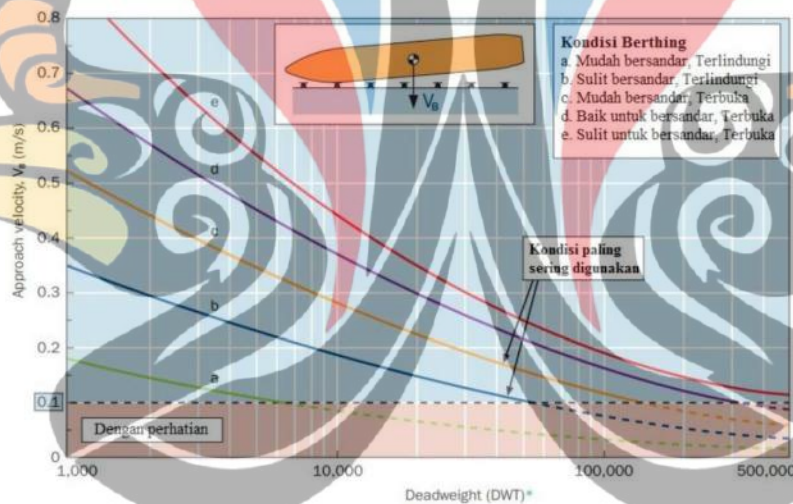
PIANC, 2002 merekomendasikan bahwa faktor dampak abnormal, ketika diturunkan, sebaiknya berada dalam rentang 1,1 hingga 2,0. Namun, pengecualian dapat diberikan dalam kondisi tertentu, terutama jika *fender* atau struktur dermaga terus digunakan secara berkelanjutan dalam situasi khusus. Rentang ini bertujuan untuk memastikan keamanan dan keandalan *fender* dalam menyerap energi tumbukan, sambil mempertimbangkan batas toleransi struktur agar tetap berfungsi optimal tanpa risiko kerusakan serius (PIANC, 2002).

2.1.6 Approach Velocity (V_B)

Kecepatan sandar (*berthing speed*) dipengaruhi oleh tingkat kesulitan atau

kemudahan kapal saat bersandar, panduan sandar yang tersedia di dermaga, serta ukuran kapal. Kondisi kecepatan pendekatan (*approach velocity*) umumnya diklasifikasikan ke dalam lima kategori seperti yang ditampilkan pada grafik 2.10. Selain itu, pemilihan kecepatan sandar (V_B) juga disesuaikan dengan lokasi tempat kapal bersandar (PIANC, 2002)

Panduan yang paling umum digunakan untuk menentukan kecepatan pendekatan kapal adalah tabel Brolsma, yang diadaptasi dari berbagai standar seperti *British Standard* (BS), PIANC, dan pedoman internasional lainnya. Grafik ini dirancang untuk membantu dalam mengestimasi kecepatan pendekatan berdasarkan kondisi spesifik, seperti ukuran kapal, jenis dermaga, dan faktor lingkungan, sehingga dapat meningkatkan akurasi perhitungan dan keselamatan dalam proses bersandar (PIANC, 2002).



Gambar 2.10 Grafik *approach velocity* (V_B)

(Sumber: PIANC, 2002)

Pada pelabuhan Penajam Paser utara kondisi berthing adalah mudah bersandar, terlindungi maka di ketahui dari grafik diatas kecepatan sandar kapal Tranship II adalah 0,26 m/s.

2.1.7 Block Coefficient (C_B)

Block coefficient (C_B) adalah fungsi dari bentuk lambung kapal dan dinyatakan dalam rumus (PIANC, 2002):

$$C_B = \frac{M}{L_{BP} \times B \times D \times \rho_{SW}} \quad (2.4)$$

Dimana :

M = Displacement of vessel (t)

L_{BP} = Length between perpendiculars (m)

B = Beam (m)

D = Draft (m)

ρ_{SW} = Seawater density ≈ 1.025t/m³

Tabel 2.3 Blok Coefficient (C_B) pada umumnya (PIANC, 2002)

Container Vessels	0,6 – 0,8
General Cargo dan Bulk Carriers	0,72 – 0,85
Tanker	0,85
Ferrie	0,55 - 0,65
RoRo Vessel	0,7 – 0,8

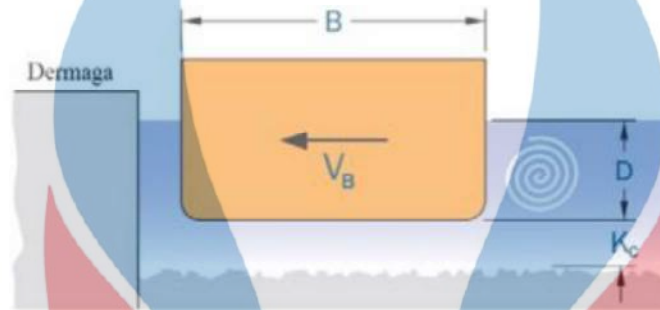
Koefisien blok yang digunakan pada penelitian ini bernilai 0,55 – 0,65 dikarenakan koefisien dari kapal *ferry*.

2.1.8 Added Mass Coefficient (C_M)

Koefisien massa tambahan atau *added mass coefficient* (C_M) memungkinkan air laut ikut terbawa bersama kapal saat kapal bergerak ke samping untuk bersandar di dermaga. Ketika kapal berhenti setelah tertahan oleh *fender*, air laut tetap memberikan dorongan pada badan kapal, yang secara efektif menambah massa total kapal (PIANC, 2002).

Metode Vasco Costa telah diadopsi secara luas sebagai referensi dalam kode desain kapal bersandar, terutama untuk kondisi di mana kedalaman air tidak jauh

lebih besar dari *draft* kapal. Metode ini menyediakan pendekatan yang akurat dalam menganalisis interaksi antara kapal, *fender*, dan dermaga, sehingga memastikan bahwa desain memenuhi kebutuhan operasional dan keselamatan dalam berbagai situasi bersandar (PIANC, 2002).



Gambar 2.11 *Pengaruh Added Mass Kepada Berthing*
(Sumber: PIANC, 2002)

Persamaan yang digunakan antara lain:

$$0,1 \leq \frac{KC}{D} \leq 0,5 \quad C_M = 1,875 - 0,75 \left[\frac{KC}{D} \right] \quad (2.5)$$

Dimana :

C_M = *mass coefficient*

D = *Draft of vessel (m)*

B = *Beam of vessel (m)*

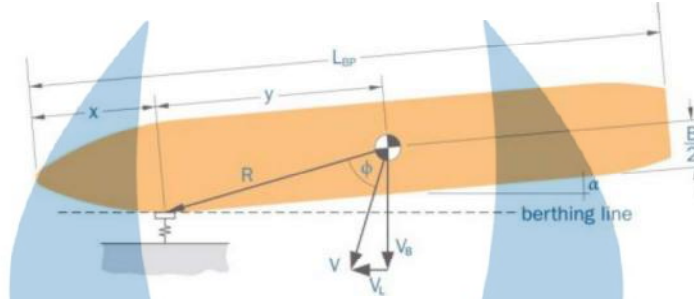
LBP = *Length between perpendiculars (m)*

KC = *Under keel clearance (m)*

2.1.9 *Eccentricity Coefficient (C_E)*

Koefisien eksentrisitas (C_E) memungkinkan sebagian energi tumbukan kapal hilang akibat rotasi kapal saat bersentuhan dengan *fender*. Penentuan posisi benturan kapal dengan *fender* secara tepat, sudut sandar (*berthing angle*), serta sudut vektor kecepatan (*velocity vector angle*) merupakan faktor-faktor penting untuk memastikan perhitungan C_E yang akurat. Dalam aplikasinya, nilai koefisien eksentrisitas dapat bervariasi antara 0,3 hingga 1,0 tergantung pada kondisi setiap kasus sandar kapal. Selain itu, kecepatan kapal (V) tidak selalu tegak lurus terhadap

garis sandar (*berthing line*) (PIANC, 2002).



Gambar 2.12 Faktor yang mempengaruhi eccentricity coefficient (C_E)

(Sumber: PIANC, 2002)

Nilai *eccentricity coefficient* (C_E) didapatkan dengan menggunakan persamaan (PIANC, 2002) :

$$C_E = \frac{K^2 + R^2 \cos^2 \phi}{K^2 + R^2} \quad (2.6)$$

Dimana :

B = *Beam* (m)

CB = *Block coefficient*

LBP = *Length between perpendiculars* (m)

R = *Centre of mass to point of impact* (m)

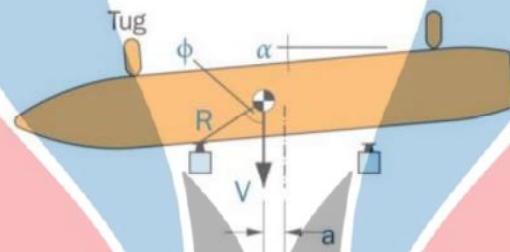
K = *Radius of gyration* (m)

VL = *Longitudinal velocity component (forward or astern)*

Untuk mendapatkan nilai R (*Centre of mass to point of impact*) dan K (*Radius of gyration*), dapat menggunakan persamaan :

$$R = \sqrt{y^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (2.7)$$

$K = (0,19 \times CB + 0,11) \times LBP$ Dengan catatan : $\phi < 10^\circ$, $CE = 1.0$ Untuk kasus *dolphin berthing*, kapal sangat jarang dapat berlabuh tepat ditengah *breasting dolphin*. ROM 0.2—90 menyarankan nilai $a = 0,1L$ dengan nilai minimum 10 m hingga 15 m jarak antara midpoint dan COG kapal.



Gambar 2. 13 *Dolphin berthing system*
(Sumber: PIANC, 2002)

2.1.10 Berth Configuration Coefficient (C_c)

Ketika kapal bersandar pada struktur dermaga tertutup dengan sudut kecil, air yang terperangkap di antara lambung kapal dan dermaga bertindak sebagai peredam, mengurangi sebagian kecil energi sandar. Besarnya kontribusi faktor ini dipengaruhi oleh berbagai aspek, di antaranya (PIANC, 2002):

- Desain struktur dermaga
- *Underkeel clearance*
- *Velocity* dan *angle of approach*
- Proyeksi *fender*
- Bentuk lambung kapal

PIANC merekomendasikan menggunakan nilai – nilai antara lain :

Tabel 2.4 Nilai C_c yang direkomendasikan (PIANC, 2002)

$C_c = 1$	Struktur dermaga terbuka dengan menggunakan pile
	Berthing angle $> 0,5^\circ$
	Kecepatan berthing yang sangat rendah

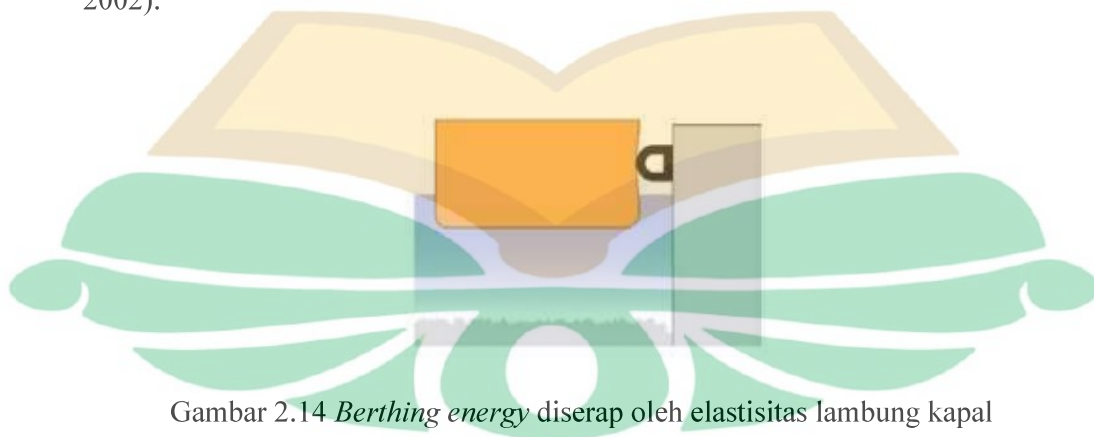
Underkeel clearance yang besar	
Cc = 0,9	Struktur dermaga tertutup
	Berthing angle > 0,5°

Catatan:

Jika *underkeel clearance* telah diperhitungkan untuk memasukkan pengaruh *added mass coefficient* (C_M), maka nilai koefisien konfigurasi dermaga (C_C) yang umum digunakan adalah 1,0. Hal ini menunjukkan bahwa desain dermaga mempertimbangkan pengaruh massa tambahan kapal secara optimal, sehingga memberikan kestabilan pada perhitungan energi sandar. Pemilihan nilai $C_C = 1,0$ biasanya dilakukan untuk menyederhanakan analisis sambil memastikan keandalan desain dalam berbagai kondisi operasional.

2.1.11 Softness Coefficient (C_s)

Fender memiliki sifat yang cukup keras untuk meredam energi sandar dari lambung kapal. Oleh karena itu, sebagian energi sandar akan diserap melalui deformasi elastis pada lambung kapal itu sendiri. Deformasi ini terjadi karena kemampuan lambung kapal untuk menyesuaikan bentuknya sementara waktu, yang membantu mengurangi dampak benturan. Proses ini penting untuk memastikan bahwa kapal dapat berfungsi secara efektif dalam menyerap energi tumbukan, sehingga mengurangi potensi kerusakan pada kedua struktur tersebut (PIANC, 2002).



Gambar 2.14 *Berthing energy* diserap oleh elastisitas lambung kapal

(Sumber: PIANC, 2002)

PIANC merekomendasikan nilai - nilai antara lain :

Tabel 2.5 Nilai Cs yang direkomendasikan (PIANC, 2002)

Nilai Cs	Keterangan
CS = 1,0	<i>Soft fenders</i> ($\delta f > 150$ mm)
CS = 0,9	<i>Hard fenders</i> ($\delta f \leq 150$ mm)

2.1.12 Jarak Antar *Fender*

Perencanaan *fender* penentuan jarak antar *fender* sangat diperhatikan untuk menghindari kegagalan pada sistem di pelabuhan seperti kapal menabrak dermaga dan kerusakan pada kapal. Maka dari itu perlu merencanakan jarak *fender* yang sesuai dan mengacu pada PIANC khususnya untuk kapal *ferry* tidak boleh melebihi batas $0,25 L$ yang dimana L adalah LOA dari dimensi kapal terkecil yang pernah berlabuh dipelabuhan (PIANC, 2002). Persamaan sebagai berikut:

$$\text{Jarak antar } fender = 0,25 \times LOA \quad (2.8)$$

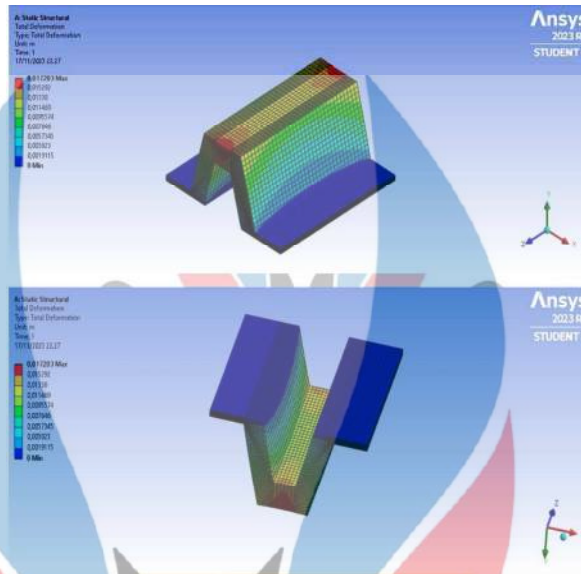
Dimana,

LOA = Panjang Kapal

2.1.13 Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran suatu benda atau objek yang terjadi akibat penyerapan energi yang bekerja pada benda atau objek tersebut. Deformasi dapat dibagi menjadi dua jenis antara lain (Shibata, 2021):

1. Deformasi elastis adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu benda akibat adanya beban yang diterapkan. Namun, ketika beban tersebut dihilangkan, benda kembali ke bentuk atau ukuran aslinya semula. Pada gambar 2.15 adalah contoh total deformasi pada *fender* V yang dimodelkan menggunakan bantuan *software ansys workbench*.



Gambar 2. 15 Deformasi *fender V* variasi 0,35 m/s

(Sumber: Muhammad Haekal, 2024)

2. Deformasi plastis adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu benda akibat diberi beban, di mana perubahan tersebut bersifat permanen dan tidak dapat kembali ke kondisi semula meskipun beban dihilangkan.

Dalam hal ini analisis deformasi yang diamati adalah panjang *fender*. Diperlukan perhitungan terkait kegagalan struktur *fender* untuk memastikan apakah memenuhi kriteria *compression set* material sebesar 30%. Kriteria ini mengacu pada katalog yang didasarkan pada pengujian menggunakan standar ASTM D395, seperti yang dijelaskan melalui persamaan antara lain:

$$\text{Total Deformasi} \leq 30 \% \text{ Fender Height} \quad (2.9)$$

2.1.14 Von – Mises Theory

Menurut teori ini, kegagalan suatu material terjadi apabila tegangan geser oktahedral yang bekerja di dalam material mencapai nilai yang setara dengan tegangan geser oktahedral pada saat material mengalami batas leleh (*yield*) dalam pengujian tarik satu arah (*uniaxial tensile test*). Berdasarkan prinsip tersebut, diturunkan suatu persamaan dari persamaan tegangan ekuivalen von mises untuk

menentukan kondisi kegagalan. Persamaan yang dipakai untuk menentukan batas izin tegangan adalah persamaan von mises yang telah dikembangkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{oct}} &= \frac{1}{3} [(S_{\text{yield}} - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - S_{\text{yield}})^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= 2^{\frac{1}{2}} \times \frac{S_{\text{yield}}}{3}\end{aligned}\quad (2.10)$$

τ_{oct} = Octahedral Shear Stress (Pa)

S_{yield} = Max Tensile Stress kondisi yield (deformasi plastis) dalam *uniaxial tensile test* (Pa)

Untuk mencari tegangan yang terjadi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = p/A \quad (2.11)$$

σ = Tegangan (N/mm²)

P = gaya beban (n)

A = Luas permukaan (mm²)

2.1.15 Monte Carlo

Metode Monte Carlo adalah teknik simulasi berbasis probabilitas yang mendekati solusi suatu permasalahan melalui proses sampling acak. Metode ini melibatkan penentuan distribusi probabilitas sebagai dasar pengambilan sampel acak untuk menghasilkan data. Monte Carlo sangat cocok diterapkan pada sistem yang mengandung elemen-elemen dengan sifat tidak pasti atau cenderung probabilistik. Inti dari teknik ini adalah melakukan eksperimen probabilistik melalui pengambilan sampel secara acak. Istilah *Monte Carlo* kini sering dikaitkan dengan simulasi probabilistik, meskipun secara lebih spesifik, *Monte Carlo* adalah metode untuk memilih angka secara acak sesuai dengan distribusi probabilitas tertentu, yang kemudian diterapkan dalam eksperimen simulasi. Pada Penelitian ini metode tersebut digunakan untuk menghitung probabilitas kegagalan pada *fender* di Pelabuhan *ferry* Penajam Paser Utara menggunakan persamaan (Devi, 2021):

Nilai Kuat Batas

$$Z = R/S \quad (2.12)$$

Dimana:

Z = Nilai Kuat Batas

R = Nilai Ketahanan

S = Nilai Beban

Kriteria Penilaian:

- Jika $Z \geq 1$, maka struktur aman
- Jika $Z < 1$, maka struktur gagal

Persamaan probabilitas kegagalan dapat diukur dengan menghitung jumlah kegagalan ($Z < 1$) terhadap keseluruhan data yang di uji (Wachid Hasyim, 2024).

$$Pf = Ni / \sum N \quad (2.13)$$

Dimana:

Pf = Probabilitas kegagalan

Ni = Jumlah Simulasi $Z < 1$

N = Jumlah Simulasi Total

Jika nilai Pf (probabilitas kegagalan) sangat kecil (misalnya di bawah 0,001), maka struktur *fender* dikategorikan sangat andal. Dalam simulasi ini, dengan parameter yang telah disebutkan, nilai Z sebagian besar jauh di atas 1, sehingga struktur *fender* dinyatakan aman terhadap beban simulasi.

Nilai tegangan von mises (S) dibangkitkan secara acak sebanyak 10.000 kali menggunakan distribusi normal $N(\mu, \sigma)$. Proses pembangkitan dilakukan secara acak agar mencerminkan variasi ketidakpastian dalam kondisi nyata seperti variasi beban kapal, arah tumbukan, dan sifat material *fender*. Pembangkitan data ini dilakukan dalam program excel dengan rumus (Saprizal, 2016):

$$f(t) = (1 / (\sigma\sqrt{2\pi})) * \exp \{ -1/2 * ((t - \mu)/\sigma)^2 \} \quad (2.14)$$

Dimana:

μ = Nilai Tegangan Von Mises

σ = Koefisien

t = Nilai Acak

Dalam aplikasi excel, rumus distribusi normal untuk membangkitkan nilai acak digunakan sebagai berikut:

=NORM.INV(RAND(); μ ; σ)

Dimana:

μ = Nilai Tegangan Von Mises

σ = Koefisien

Nilai Koefisien didapatkan berdasarkan buku *reliability of structure* yang ditulis oleh Andrzej S. Nowak (2000) sebesar 10%.

Dalam simulasi Monte Carlo pada penelitian ini, digunakan nilai koefisien variasi (Coefficient of Variation, CV) sebesar 10% sebagai representasi dari simpangan baku relatif terhadap nilai rata-rata. Pemilihan nilai ini didasarkan pada rekomendasi literatur teknik, salah satunya oleh Nowak dan Collins (2000) dalam *Reliability of Structures*, yang menyarankan penggunaan nilai CV antara 5% hingga 15% untuk material struktural seperti baja dan beton. Nilai 10% dianggap sebagai nilai yang moderat, karena tidak terlalu konservatif namun tetap mencerminkan ketidakpastian yang realistis dalam sifat material dan beban struktur.

Pada kondisi di mana data statistik eksperimen tidak tersedia secara lengkap, penggunaan CV 10% telah menjadi praktik umum dalam berbagai studi teknik sebagai pendekatan asumsi yang masuk akal. Dengan demikian, pemilihan nilai ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara ketelitian simulasi dan efisiensi perhitungan, sekaligus memastikan hasil yang tetap representatif terhadap kondisi aktual di lapangan. Menurut Thuy Vu (2018), jumlah iterasi simulasi Monte Carlo minimal 5.000–10.000 kali dibutuhkan untuk mendefinisikan distribusi fungsi batas secara memadai. Untuk akurasi <1% pada tingkat kepercayaan 99%, dibutuhkan 16.641 iterasi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan 10.000 simulasi untuk menjamin stabilitas hasil dan memenuhi standar keakuratan statistik. Berdasarkan Pengfei Tu (2018) menjelaskan bahwa untuk memverifikasi hasil prediksi keandalan teoretis biasanya menggunakan jumlah 10.000 iterasi.

2.1.16 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) adalah pendekatan numerik yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah kompleks dalam bidang teknik dan fisika. Metode ini membagi domain masalah menjadi elemen-elemen kecil, sehingga perhitungan solusi dapat dilakukan secara lokal pada setiap elemen. FEM sering digunakan dalam analisis struktur, perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik, di mana fenomena fisik dijelaskan melalui persamaan diferensial parsial. Dengan menggunakan proses diskretisasi, formulasi matriks, dan teknik numerik, metode ini memberikan solusi yang mendekati akurat, bahkan untuk geometri yang rumit dan kondisi batas yang sulit. Walaupun membutuhkan sumber daya komputasi yang besar, FEM tetap menjadi alat penting dalam berbagai aplikasi teknik kontemporer (Hajar Isworo, 2018).

2.2 Penelitian Terdahulu

Dibawah ini adalah ringkasan dari penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian yang telah dilakukan.

No	Judul	Hasil
1	Analisis Kapasitas <i>Fender</i> Tipe V Pada Dermaga Curah Pelabuhan Garongkong Kabupaten Barru (Fitriyanti, 2020).	Metode: Penelitian ini menggunakan metode pengambilan data di Pelabuhan Garongkong. Data primer diperoleh melalui wawancara, observasi, dan pengukuran langsung terhadap arus di dermaga pelabuhan. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari dokumen resmi instansi terkait, mencakup informasi ukuran kapal, spesifikasi <i>fender</i> , dan tata letak pelabuhan Garongkong. Hasil: Hasil analisis menunjukkan bahwa energi yang diserap <i>fender</i> (5,57 tm) lebih besar daripada energi tambat kapal (4,54 tm), sehingga <i>fender</i> dapat menahan energi benturan kapal dengan baik. Selain itu, gaya bentur yang diserap <i>fender</i> (12,79 ton) lebih kecil dibandingkan gaya reaksi maksimum <i>fender</i> (26,31 ton). Energi yang diteruskan <i>fender</i> ke struktur dermaga tercatat sebesar 3,36 tm.
2	Perencanaan Dermaga Kapal Pengangkut Ternak Pada	Metode: Penelitian ini menggunakan metode <i>Forecasting</i> Hasil: Hasil penelitian menghasilkan

No	Judul	Hasil
	Pelabuhan Calabai, Nusa Tenggara Barat (Bambang Sudjasta, 2022).	perencanaan dermaga tipe jetty dengan ukuran 83m x 15m, yang dilengkapi dua jembatan (trestle) sepanjang 25m x 6m sebagai penghubung ke daratan. Dermaga dirancang untuk melayani satu kapal ternak berkapasitas 1.587 GRT. Fasilitas pendukung yang direncanakan mencakup 14 unit <i>fender</i> dengan dimensi 0,7m x 0,4m, 4 unit bollard dengan jarak antar bollard 15 meter, serta alat bongkar muat ternak berbasis hidrolik untuk efisiensi proses bongkar muat. Selain itu, terdapat tempat karantina hewan berukuran 32m x 24m dengan kapasitas 150 ekor sapi dan 4 tangki penampungan kotoran masing-masing berkapasitas 16,359 m ³ . Layout dermaga juga mencakup kantor, ruang tunggu, gudang, lahan parkir truk, dan pos satpam. Dermaga ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi pengiriman ternak dan mengurangi risiko cedera pada hewan selama proses pengangkutan.
3	Analisis Perencanaan <i>Fender</i> Pada Pelabuhan Patimban (Deddy Yoshua, Suwandi Saputro, 2022)	Metode: Penelitian ini menganalisis perencanaan <i>fender</i> di Pelabuhan Patimban untuk dermaga kapal peti kemas dan kapal Ro-Ro menggunakan data sekunder dan perhitungan dengan Microsoft Excel. Proses mencakup analisis energi benturan (berthing energy), pemilihan tipe <i>fender</i> (<i>Fender</i> Type V dan SPC), serta penghitungan jarak antar <i>fender</i> . Hasil: Energi benturan mencapai 3090,510 ton-m untuk kapal peti kemas dan 141,459 ton-m untuk kapal Ro-Ro. <i>Fender</i> SPC 1300 dipilih untuk dermaga kapal peti kemas, dan <i>Fender</i> SPC 1100 untuk dermaga kapal Ro-Ro karena efisiensi dan kekuatannya. Jarak antar <i>fender</i> dihitung 19,809 meter (kapal peti kemas) dan 12,022 meter (kapal Ro-Ro), dengan pemasangan vertikal untuk menyesuaikan perubahan elevasi air laut.
4	Penentuan Tipe <i>Fender</i> Dermaga Untuk Kapal <i>Multipurpose</i> Berukuran Maksimum 30.000 DWT (Shabrina Rachma	Metode: Penelitian kuantitatif ini menganalisis sistem <i>fender</i> di Terminal Bungkutoko-Kendari untuk kapal peti kemas dan general cargo (kapasitas maksimum 30.000 DWT). Perhitungan meliputi <i>berthing energy</i> , pemilihan tipe <i>fender</i> , jarak antar <i>fender</i> , serta gaya bentur menggunakan standar

No	Judul	Hasil
	Putri, 2023)	internasional (PIANC, 2022). Hasil: <i>Berthing energy</i> tercatat 592 kNm untuk kapal peti kemas dan 316,45 kNm untuk general cargo. <i>Fender</i> tipe SCN 1.150H F 1.2 dipilih dengan jarak pemasangan 4,6 meter. Gaya bentur dan tambat berada di bawah ambang batas yang diizinkan, memastikan sistem <i>fender</i> berfungsi optimal untuk dermaga multipurpose.
5	Perencanaan Dermaga Pelabuhan Peti Kemas Maloy Kutai Timur (Dian Pranata P.A, 2019)	Metode: Penelitian ini menggunakan pendekatan teknis untuk perencanaan dermaga peti kemas di Pelabuhan Maloy, Kutai Timur, yang dirancang untuk melayani kapal berkapasitas 40.000 DWT. Metode yang digunakan meliputi survei topografi, bathimetri, analisis pasang surut, analisis gelombang, dan penyelidikan tanah. Struktur dermaga dirancang menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk menghitung pembebanan dan kekuatan struktur, termasuk momen positif dan negatif maksimum. Perencanaan mencakup berbagai beban seperti beban mati, hidup, tambat, angin, gempa, dan gelombang. Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa dermaga peti kemas di Pelabuhan Maloy dirancang dengan tipe <i>Deck on Pile</i> berukuran 300 m x 30 m untuk melayani kapal berkapasitas 40.000 DWT. Struktur dermaga menggunakan tiang pancang baja tipe ASTM A252 dengan diameter 700–1000 mm, dan elevasinya ditentukan pada +5,00 m LAT berdasarkan analisis pasang surut, gelombang, dan kenaikan muka air laut. <i>Fender</i> karet tipe SCN 1000 dengan kapasitas energi 34,45 ton-m digunakan, dengan jarak antar <i>fender</i> 10,8 meter yang dipasang pada jalur balok melintang. Bollard dengan kapasitas tarik 100 ton dirancang sebanyak 12 buah dengan jarak antar <i>bollard</i> 25 meter. Struktur dermaga dirancang menggunakan beton bertulang dengan balok utama berukuran 80x60 cm, 100x80 cm, dan 160x120 cm, disesuaikan dengan hasil analisis pembebanan. Desain ini diharapkan mampu mendukung efisiensi operasional pelabuhan serta pengembangan kawasan industri Maloy.

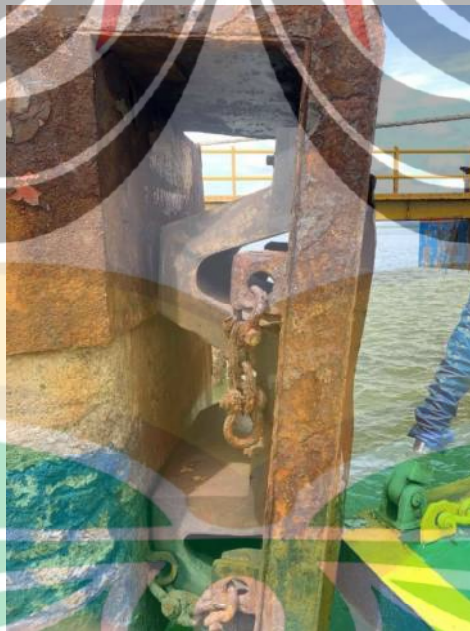
No	Judul	Hasil
6	Penilaian Risiko Kuantitatif Tubrukan Kapal dengan Platform : Studi Kasus Tubrukan Kapal dengan <i>Wellhead Platform</i> PHE-12 (Faiz Farhansyah, Yeyes Mulyadi, dan AA.Bgs.Dinariyana, 2016)	Metode: Penelitian ini menilai risiko tubrukan kapal dengan platform PHE-12 menggunakan metode CRASH untuk menghitung frekuensi kejadian berdasarkan dua skenario: head-on collision dan drifting collision. Analisis konsekuensi dilakukan dengan menghitung energi kinetik dan rasio plastisitas menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menentukan probabilitas kegagalan struktur. Hasil: Frekuensi head-on collision adalah 0,02139 (jarang terjadi), sementara drifting collision sebesar 0,02999 (sekitar 1 kali dalam 30 tahun). Tubrukan drifting dari arah 600 dengan kecepatan 3 knot memiliki energi kinetik 7,7 kips/ft dan probabilitas kegagalan struktur 37,1%. Risiko berada pada kategori Not Acceptable (level 4) dalam matriks risiko.
7	Desain Struktur Dermaga <i>Multipurpose</i> 15000 DWT Pelabuhan Tanjung Gelon Desa Kembang Kecamatan Pacitan Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Beton Pracetak (Aditya Arif Hartanto, 2022)	Metode: Penelitian ini merancang dermaga <i>Multipurpose</i> 15,000 DWT di Pelabuhan Tanjung Gelon menggunakan data kelautan (pasang surut, arus, angin) dan data struktur (mutu beton, baja, <i>fender</i>, dan bollard). Beban-beban dihitung berdasarkan standar desain, dan pemodelan struktur dilakukan dengan SAP2000 untuk memastikan kekuatan elemen seperti pelat lantai, balok, pilecap, dan tiang pancang. Hasil: Dermaga dirancang dengan panjang 200 m, lebar 42,5 m, dan kedalaman kolam 15 m. Elemen utama meliputi pelat beton komposit setebal 500 mm, balok komposit 1000 x 1500 mm, dan tiang pancang baja diameter 1000 mm dengan panjang 36 m. <i>Fender</i> tipe HC1150H mampu menyerap energi 66,4 ton, dan bollard MT100 memiliki kapasitas tarik 100 ton. Semua elemen dinyatakan aman terhadap beban maksimum.
8	<i>Structure Design of Liquid Bulk Dolphin Berth at Kota Cilegon, Banten</i> (Raihan Afif Yuzar, 2019)	Metode: Metode penelitian ini mencakup pengumpulan data lingkungan, karakteristik kapal, dimensi struktur, serta material, yang kemudian diolah menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk analisis struktur. Perhitungan dilakukan untuk berbagai jenis beban, seperti berthing, mooring, gempa, dan lingkungan, guna menentukan dimensi elemen struktural dan kedalaman tiang pancang sesuai

No	Judul	Hasil
		standar SNI dan BS. Hasil: Hasilnya menunjukkan bahwa desain dermaga, termasuk loading platform, breasting dolphin, dan mooring dolphin, memenuhi kriteria kekuatan dengan nilai Unity Check Ratio (UCR) di bawah 1, defleksi dalam batas aman, dan daya dukung tanah memadai untuk kedalaman pemancangan yang direncanakan. Desain ini memastikan dermaga mampu menahan beban operasional dan lingkungan dengan aman.
9	Analisis Teknis Dermaga Lampia (Chairul Paotonan dkk., 2021)	Kapasitas Struktur Pelabuhan Metode: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas teknis dermaga Pelabuhan Lampia, yang telah beroperasi lebih dari 10 tahun, untuk melayani kapal pengangkut Crude Palm Oil (CPO). Data yang dikumpulkan meliputi dimensi dan kondisi struktur dermaga, data kapal (ukuran dan bobot), hidro-oseanografi (arus, gelombang, dan angin), serta data gempa. Kondisi material dermaga juga dievaluasi, dengan mutu beton diasumsikan mengalami degradasi menjadi K-275 dan kekuatan baja tiang pancang menurun 20%. Hasil: Hasil analisis menunjukkan bahwa dermaga dapat melayani kapal dengan berat hingga 1027 DWT jika menggunakan faktor keamanan (SF) 1,5. Namun, jika faktor keamanan dinaikkan menjadi 2,0, dermaga hanya mampu melayani kapal dengan berat maksimum 510 DWT. Beban benturan kapal meningkat sesuai dengan bobot kapal, mulai dari 4,1 ton (500 DWT) hingga 24,6 ton (3000 DWT). Beban angin, arus, dan gelombang juga bervariasi, masing-masing berkisar antara 0,24–0,74 ton, 0,82–3,14 ton, dan 5–6,3 ton tergantung pada ukuran kapal.
10	Structural Analysis Of Maritim Fenders (Yuri David do Nascimento Fernandes dkk., 2023)	Metode: Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga yang bertujuan menganalisis struktur <i>fender</i> maritim di Pelabuhan Itaquí, Brasil, dengan fokus pada performa karet <i>fender</i> dalam menyerap energi tumbukan kapal. Data yang digunakan meliputi dimensi kapal, variasi pasang surut, arus laut, kecepatan angin, dan kondisi lingkungan pelabuhan. Standar desain seperti BSI (2014)

No	Judul	Hasil
		dan ABNT (1987) digunakan untuk perhitungan energi kinetik kapal yang dihitung menggunakan rumus konservasi energi, dengan mempertimbangkan faktor seperti massa kapal, kecepatan kapal, eksentrisitas tumbukan, konfigurasi dermaga, dan faktor keamanan. Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum pada inti karet <i>fender</i> adalah 0,798 MPa, dengan deformasi signifikan yang menyerupai buckling di area tengah. Inti karet memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan, menunjukkan elastisitas material yang baik.

2.3 Kondisi *Fender Existing*

Fender yang saat ini digunakan di Pelabuhan *Ferry* Penajam adalah *fender* tipe V. Namun, kondisi *fender* di Pelabuhan *Ferry* Penajam telah mengalami kerusakan, dan pemasangannya berada dalam posisi terbalik. Meskipun demikian, dalam proses pemodelan, desain *fender* akan mengacu pada pemasangan yang sesuai dengan standar yang benar (PIANC, 2002).



Gambar 2. 16 Kondisi *fender existing*