



JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

ANALISIS TUBRUKAN PADA HALUAN KAPAL MT. KUANG 6500 DWT TERHADAP JETTY DENGAN DAN TANPA FENDER

Yusuf Hidayatullah^{*}, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Samuel¹⁾

Laboratorium Struktur dan Konstruksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl.

Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}e-mail :hidayatullahyusuf23@gmail.com,

Abstrak

Penelitian ini melakukan simulasi tubrukan haluan kapal MT.Kuang 6500 DWT terhadap jetty dengan dan tanpa fender. Penelitian menggunakan metode elemen hingga dengan software Abaqus 6.14 yang bertujuan mengkaji tingkat kerusakan kapal saat mengalami tubrukan terhadap jetty. Jurnal ini hanya menunjukkan variasi dalam kecepatan 3 knot serta sudut kedatangan kapal 90° dan 45° terhadap jetty. Hasil penelitian menunjukkan tingkat kerusakan pada lambung kapal menjadi lebih kecil dengan pengaplikasian fender. Tubrukan tidak dilengkapi fender menghasilkan strain sebesar 0,2 untuk sudut 90° dan 0,1 untuk sudut 45° sedangkan tubrukan dilengkapi fender hanya menghasilkan strain yang lebih kecil senilai 0,17 dan 0,07 secara beruntun. Pada kontak tubrukan 3 m diatas lunas, strain yang dihasilkan berturut-turut 0,2 dan 0,12 serta 0,17 dan 0,1. Patah pelat hanya terjadi pada sudut 90° terhadap jetty tanpa fender. Tubrukan tanpa fender mengalami tingkat kerusakan lebih besar, namun demikian tingkat kerusakan berupa robekan pelat hanya terjadi pada area sekitar linggi haluan kapal dan tidak mencapai area sekat haluan. Hal ini memungkinkan kapal tetap dalam keadaan mengapung meskipun area fore peak tank mengalami kebocoran.

Kata Kunci : Tingkat Kerusakan, Energi Kinetik, Gaya Maksimum, Fender

1. PENDAHULUAN

Kecelakaan kendaraan bisa terjadi dimana saja termasuk di pelabuhan. Menurut data Investigasi KNKT, setidaknya ada 25 peristiwa atau 46% dari total kecelakaan yang berupa tubrukan kapal pada periode 2007 – 2014 di wilayah perairan Indonesia [1].

Salah satu kerugian dari terjadinya tubrukan kapal tentu saja adalah terbentuknya deformasi pada lambung kapal atau bahkan timbulnya tumpahan minyak yang keluar ke laut.

Penelitian sebelumnya yang hampir serupa pernah dilakukan oleh [2]. Analisa tersebut berupa kapal tongkang jenis *Barge* menabrak

jembatan yang dalam simulasi berupa dinding kaku akibat dari hantaman gelombang yang besar sehingga kapal tongkang tersebut terbawa gelombang dan menabrak jembatan dengan kecepatan dan waktu tertentu [2].

Sebelumnya, mahasiswa S-1 Teknik Perkapalan Undip sudah pernah melakukan penelitian mengenai analisa tubrukan pada lambung kapal SPOB bagian buritan[3] serta lambung kapal AWB bagian tengah kapal [4].

Mengingat dampak dari tubrukan kapal yang memberikan berbagai kerugian bagi berbagai pihak yang terlibat sehingga perlu

dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai analisa tubrukan kapal dengan variasi berbeda. Pada penelitian kali ini akan menggunakan studi kasus kapal *crude oil tanker* MT. KUANG 6500 DWT. Pada simulasi, bagian lambung kapal yang akan menabrak *jetty* berupa dinding kaku dengan dan tanpa *fender* pada variasi sudut 45° dan 90° serta variasi kecepatan 3 knot dalam waktu 5 detik adalah bagian haluan kapal dan menganalisa seberapa besar dampak dari tubrukan tersebut terhadap konstruksi kapal pada area kontak tubrukan tersebut.

2. DASAR TEORI

2.1 Konsep Tubrukan Kapal dengan *Jetty*

Skema tubrukan pada haluan kapal MT. KUANG 6500 DWT dengan *jetty* dilakukan dengan kapal mendekati *jetty* pada arah 45° dan 90° terhadap *jetty* pada kecepatan kapal sebesar 3 knot dalam waktu 5 detik. Kontak tubrukan dilakukan saat sarat penuh kapal dan sarat dangkal 3 m.

Fender akan dipasang pada tepi *jetty* yang menghadap kapal dan hanya *Fender* tipe *square* yang digunakan.

Kondisi yang dilakukan pada analisa ini hanya dua yaitu:

1. *Jetty* yang dilengkapi *fender*
2. *Jetty* yang tidak dilengkapi *fender*.

2.2 Perhitungan Energi Kinetik

Total energi kinetik yang terjadi akibat tubrukan kapal dengan *jetty* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan [5].

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Keterangan:

E = Energi Kinetik (J)

m = massa benda/kapal (kg)

v = Kecepatan tubrukan (m/s)

2.3 Metode Elemen Hingga

Dasar dari metode elemen hingga adalah menemukan solusi dari masalah yang kompleks lalu menggantikannya dengan yang

lebih sederhana sehingga mendapatkan solusi perkiraan yang mendekati solusi eksaknya [6].

2.4 Gaya Impak

Gaya impak adalah gaya yang diterima oleh suatu benda sampai benda tersebut tidak dapat lagi menerima gaya tersebut dan putus [7].

2.5 Abaqus 6.14

Pada CAE Abaqus v6.14, percepatan dari *node* manapun ditentukan oleh massa dan perbedaan gaya yang bekerja padanya. Maka persamaannya dapat ditulis sebagai berikut [8]:

$$\dot{u}_{(i)}^N = \frac{P_{(i)}^J - I_{(i)}^J}{M^{NJ}} \quad (2)$$

Keterangan:

\dot{u}^N : acceleration

I^J : internal force vector

P^J : applied load vector

M^{NJ} : mass matrix

2.6 Material Fender

Fender menggunakan jenis *square* yang memiliki bentuk penampang segi empat. Material *rubber mooney-rivlin* dipilih untuk *fender* karena dapat meregang sampai 200% contohnya pada ban truk atau ban mobil. Nilai *strain energy potential* (W) untuk *mooney-rivlin* secara umum adalah sebagai berikut [9]:

$$W = C_{01}(I_2 - 3) + C_{10}(I_1 - 3) \quad (3)$$

I_1 dan I_2 merupakan *invariant* dari *strain* pada *rubber* sedangkan C_{01} dan C_{10} merupakan konstanta untuk respon perubahan bentuk yang didapat dari hasil *tensile test* material *rubber* yang diperoleh dari [10]:

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Pada pengujian kali ini penulis menggunakan analisis metode elemen hingga tubrukan antara kapal terhadap *jetty* menggunakan model dan disimulasikan dengan CAE Abaqus v6.14 sesuai dengan data kecepatan, sudut, dan material.

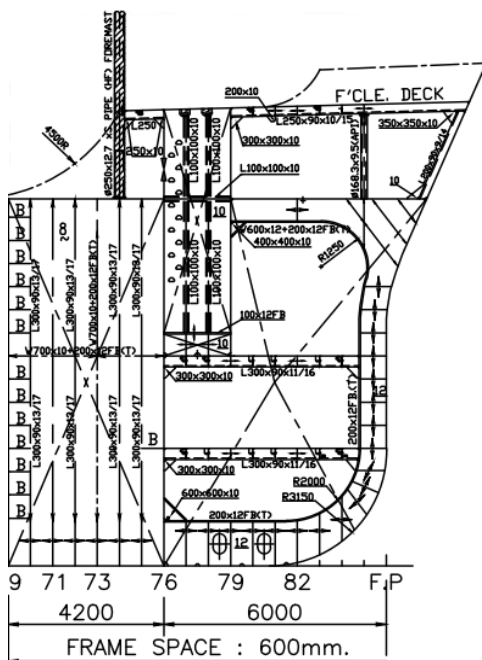
Dalam melakukan penelitian, data didapat dari galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang berupa gambar *lines plan*, RU,

Profil Contruction. Ukuran utama kapal dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan ilustrasi desain haluan kapal MT. Kuang pada gambar 3.1.

Dapat dilihat pada gambar 3.1 bahwa haluan MT. Kuang menggunakan sistem konstruksi melintang karena tidak menggunakan *side longitudinal* melainkan *main frame*.

Tabel 3.1 Data kapal yang akan digunakan dalam pengujian tubrukan

DATA KAPAL	
Nama Kapal	MT. KUANG
Tipe Kapal	<i>Crude Oil Tanker</i>
LOA	104,7 m
LPP	99,00 m
B	18,8 m
H	9,5 m
cb	0,798
<i>speed</i>	12 knot
<i>class</i>	BKI



Gambar 3.1 Konstruksi Haluan MT. Kuang

3.2 Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh kemudian diolah dengan tahapan sebagai berikut :

a) *Part*

Langkah ini mencakup proses pemodelan

kapal dan *jetty* menggunakan *software* Rhinoceros untuk membuat model tiga dimensi lalu meng-*convert* model tersebut ke dalam Abaqus v6.14

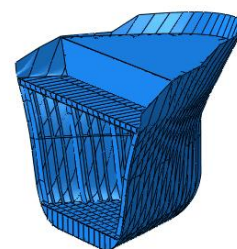
Jenis elemen yang digunakan adalah *shell* yang berbentuk pipih panjang karena kapal terdiri dari lembaran pelat baja. *Jetty* dan *Fender* diberikan jenis elemen *solid* sehingga model memiliki bentuk bangun ruang pejal. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat di tabel 3.2.

Selanjutnya, elemen-elemen tersebut diberikan *real constant* berupa nilai yang disesuaikan dengan jenis elemen. Misalnya badan kapal yang berupa *shell*, diberikan konstanta ketebalan senilai 28 mm.

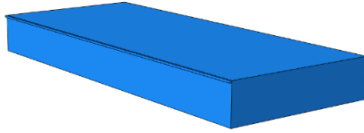
Untuk lebih jelasnya terkait elemen dan *real constant* dijelaskan pada Tabel 3.2. Proses *convert* model dari Rhinoceros ke Abaqus selesai dan ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3

Tabel 3.2 Pendefinisian Elemen

Nama	Elemen	Real Constant	
		Tipe	Nilai
Badan Kapal	<i>Shell</i>	Tebal Pelat	22 mm
			(<i>sheer strake</i>)
			28 mm
			(<i>side plate</i>)
<i>Jetty</i>	<i>Solid</i>	Luas Penampang	135 m ²
<i>Fender</i>	<i>Solid</i>	Luas Penampang	0,25 m ²



Gambar 3.2 Haluan Kapal MT. KUANG



Gambar 3.3 Jetty dan Fender

b) Property

Tahap ini merupakan tahap saat parameter material yang digunakan pada kapal, *jetty*, maupun *fender* ditentukan. Material yang digunakan merupakan baja S355 karena dikenal sebagai baja yang mudah dilas. Baja S355 memiliki *yield strength* sebesar 390 MN dan *Young Modulus* senilai 210 GPA sesuai pada [7]. Untuk lebih jelasnya, material dapat dilihat pada tabel 3.3

Material untuk *fender* berupa karet dijabarkan pada Bab 2 dan tabel 3.4 sedangkan material *jetty* berupa beton sesuai dengan [11] sesuai pada tabel 3.5. Untuk lebih jelasnya, material sebagai berikut:

Tabel 3.3 Parameter Material Kapal

Parameter Material Kapal	
<i>Density</i> (kg/m^3)	7850
<i>Young's Modulus</i> (N/m^2)	$2,1 \times 10^{11}$
<i>Poisson Ratio</i>	0,3
<i>Yield Strength</i> (N/m^2)	$3,9 \times 10^8$
<i>Plastic Strain</i>	0,1
<i>Failure Strain</i>	0,2

Tabel 3.4 Parameter Material *fender*

Parameter Material <i>Fender</i>	
<i>Density</i> (kg/m^3)	1255
C_{10} (N/m^2)	$4,9 \times 10^5$
C_{01} (N/m^2)	$1,1 \times 10^5$

Tabel 3.5 Parameter Material *jetty*

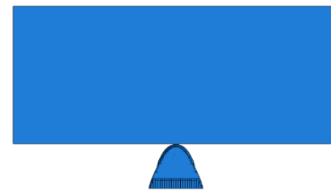
Parameter Material <i>Jetty</i>	
<i>Density</i> (kg/m^3)	1500
<i>Young's Modulus</i> (N/m^2)	$0,3 \times 10^{11}$
<i>Poisson Ratio</i>	0,25

c) Assembly

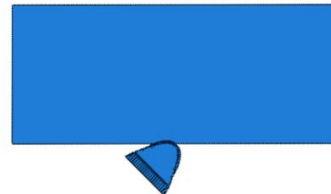
Langkah kali ini adalah menyusun *part-part* model sedemikian rupa sehingga

membentuk model haluan kapal yang sesuai desain haluan yang ada. Selain itu, penyusunan posisi kapal, *jetty*, dan *fender* dengan menyesuaikan variasi sudut simulasi juga dilakukan.

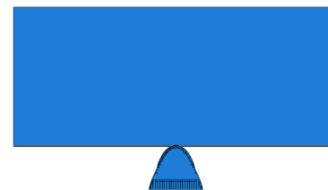
Pengaplikasikan model simulasi dengan variasi simulasi tubrukan yaitu pada sudut elevasi 45° dan 90° dengan kecepatan 3 knot terhadap *jetty* tanpa *fender* dan *jetty* dilengkapi *fender*. Pada gambar 3.4 sampai gambar 3.7 dapat dilihat bahwa sudut elevasi yang terbentuk saat detik 0 antara haluan kapal terhadap *jetty* sebesar 45° dan 90° dari sudut pandang atas. Untuk *jetty* tanpa *fender* dapat dilihat pada gambar 3.3 untuk sudut 90° serta gambar 3.4 untuk sudut 45° . Sementara itu, untuk *jetty* dilengkapi *fender*, ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 3.5 untuk sudut 90° dan Gambar 3.6 untuk sudut 45° .



Gambar 3.4 Tanpa Fender & Sudut 90°



Gambar 3.5 Tanpa Fender & Sudut 45°



Gambar 3.6 Dengan Fender & Sudut 90°



Gambar 3.7 Dengan Fender & Sudut 45°

d) Step

Tahap ini berupa langkah khusus untuk menentukan waktu dan ketentuan terkait berjalannya simulasi tabrakan yaitu pada *time period* dan *scaling factor*. *Time period* merupakan batas durasi simulasi dilakukan yang dalam hal ini selama 5 detik. Sedangkan *scaling factor* merupakan proses penyekalaan model sehingga dapat mendekati aslinya. Pada penelitian ini, massa model haluan kapal dikalikan sehingga massanya mendekati massa *displacement* kapal.

e) Interaction

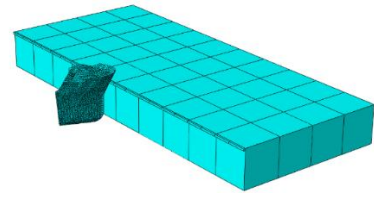
Langkah ini adalah proses menentukan kontak antar bagian model dengan suatu interaksi. Dengan interaksi umum ditentukan pada permukaan yang mencakup haluan kapal.

f) Load

Pada tahap ini model diberikan besaran distribusi berupa pemberian *velocity* serta *boundary condition* sesuai dengan variasi yang telah ditentukan yaitu kecepatan 3 knot. *Boundary condition* pada model simulasi kali ini ditentukan berada pada sisi belakang haluan kapal serta sisi belakang *jetty* sehingga simulasi terbatas dengan tepat.

g) Meshing

Meshing merupakan proses analisis berupa pembagian objek penelitian menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung untuk selanjutnya dilakukan proses simulasi. Ilustrasi hasil *meshing* untuk penelitian pada jurnal ini dapat dilihat pada Gambar 3.7 dibawah ini:



Gambar 3.7 *Meshing* dari model simulasi

h) Job dan visualization

Pada tahapan ini memungkinkan untuk melihat dan memeriksa data input sebelum memulai analisis. Setelah *job* selesai, hasil simulasi dapat dilihat pada *visualization* berupa data.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini menganalisa kerusakan pada haluan kapal akibat bertabrakan dengan *jetty* ketika akan berlabuh.

Proses analisa dan simulasi berupa tingkat kerusakan yang dialami haluan kapal terhadap *jetty* dengan *fender* dan *jetty* tanpa *fender* akibat perubahan arah dari sudut saat proses berlabuhnya kapal dengan variasi sudut 90° dan 45° pada kecepatan 3 knot.

4.1 Kerusakan akibat tabrakan pada model haluan kapal

Kerusakan pada kapal akibat tabrakan dapat dilihat pada gambar 4.1 sampai dengan gambar 4.4 serta tabel 4.1.

Pada tabel 4.1 menjelaskan bahwa Gambar 4.1a dan Gambar 4.3a mengalami robekan pada lambung kapal yang ditunjukkan dengan hilangnya sebagian element pada lambung kapal yang menandakan bahwa elemen yang hilang mengalami regangan sampai pada titik *failure* pelat kapal sebesar 0,2.

Gambar 4.1 sampai dengan gambar 4.4 menunjukkan *strain* pada permukaan kapal yang ditandai perubahan warna dari biru tua sampai ke merah sesuai pada label di samping kiri tersebut.

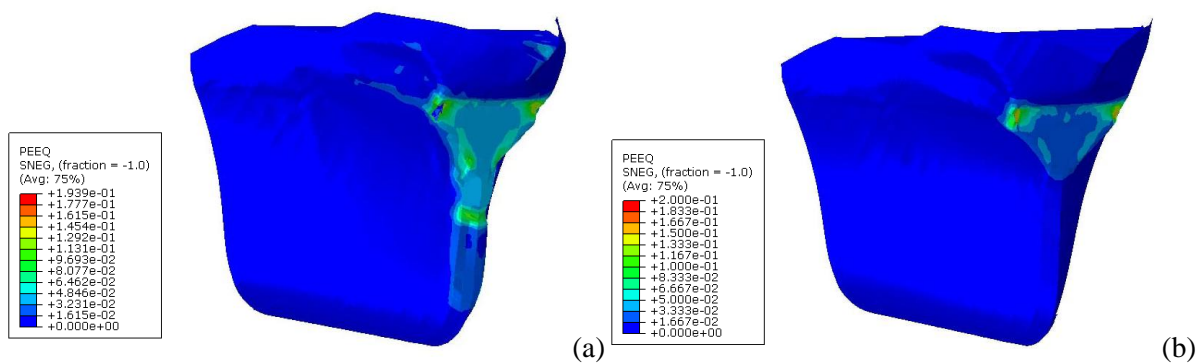
Robekan ditunjukkan dengan elemen yang hilang karena telah mencapai titik *failure* dari pelat kapal yang dalam penelitian ini sebesar 0,2. Hal ini hanya ditunjukkan pada simulasi gambar 4.1.

Pada sarat dangkal 3 m diatas lunas, tingkat kerusakan pada haluan tidak jauh berbeda dengan tubrukan pada sarat penuh. Pada sudut 90 derajat, robekan hanya terjadi pada tubrukan terhadap jetty tanpa fender. pada sudut 45 derajat, simulasi tidak mengalami robekan melainkan hanya deformasi.

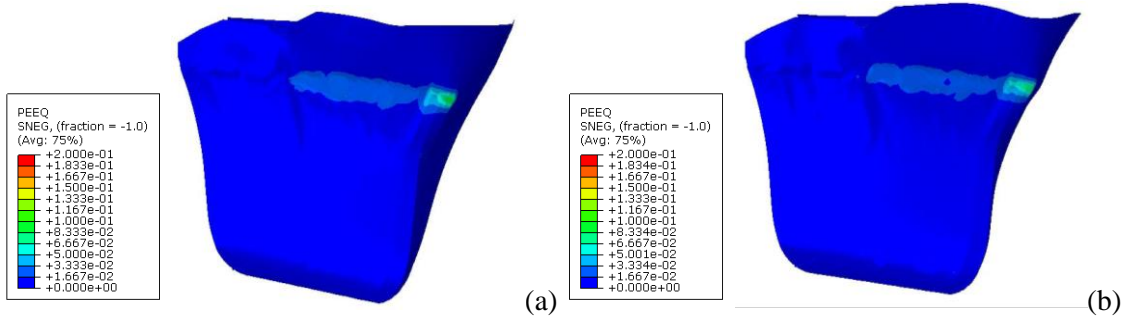
Meskipun tingkat kerusakan hampir serupa antara tubrukan pada sarat penuh dan sarat dangkal. Tubrukan pada sarat dangkal memungkinkan air untuk masuk ke kompartemen kapal karena kontak tubrukan berada dibawah garis air. Namun demikian, tingkat kerusakan berupa robekan pelat hanya terjadi pada area sekitar linggi haluan kapal dan tidak mencapai area sekat haluan. Hal ini memungkinkan kapal tetap dalam keadaan mengapung meskipun area fore peak tank mengalami kebocoran.

Tabel 4.1 Kerusakan Lambung Kapal

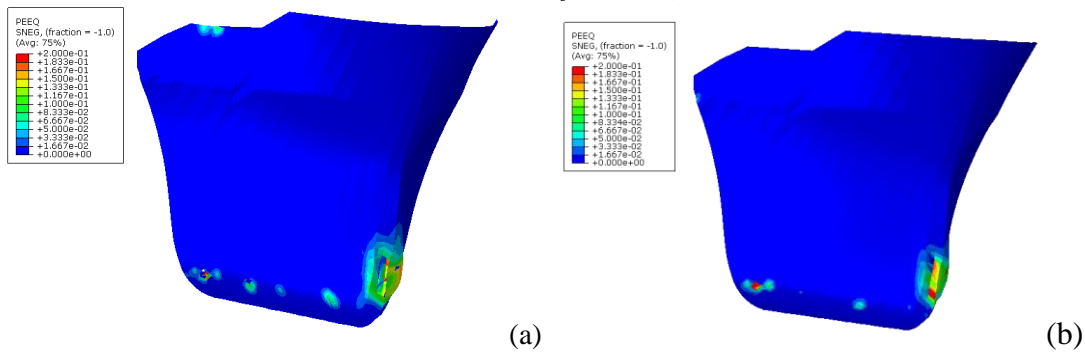
No.	Nama	Keadaan Lambung	Profil
1.	Gambar 4.1 a	Robek	Patah
2.	Gambar 4.1 b	Deformasi	Deformasi
3.	Gambar 4.2 a	Deformasi	Deformasi
4.	Gambar 4.2 b	Deformasi	Deformasi
5.	Gambar 4.3 a	Robek	Patah
6.	Gambar 4.3 b	Deformasi	Deformasi
7.	Gambar 4.4 a	Deformasi	Deformasi
8.	Gambar 4.4 b	Deformasi	Deformasi



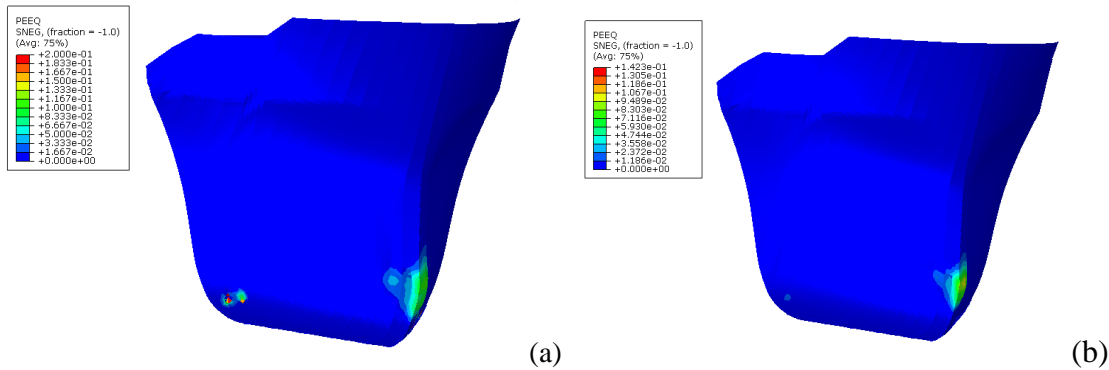
Gambar 4.1 Kerusakan akibat Tubrukan pada sudut 90° terhadap *jetty* tanpa *fender* (a) dan *jetty* dilengkapi *fender* (b)



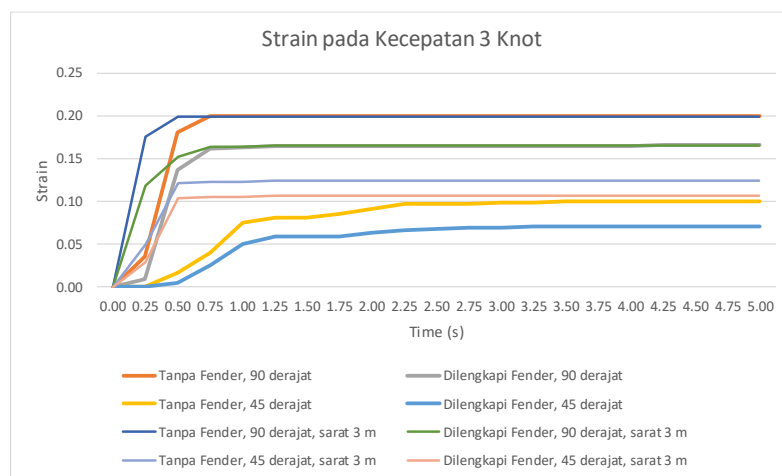
Gambar 4.2 Kerusakan akibat Tubrukan pada sudut 45° terhadap *jetty* tanpa *fender* (a) dan *jetty* dilengkapi *fender* (b)



Gambar 4.3 Kerusakan akibat Tubrukan pada sudut 90° terhadap *jetty* tanpa *fender* (a) dan *jetty* dilengkapi *fender* (b) sarat 3 m



Gambar 4.4 Kerusakan akibat Tubrukan pada sudut 90° terhadap *jetty* tanpa *fender* (a) dan *jetty* dilengkapi *fender* (b) sarat 3 m



Gambar 4.5 *Strain-Time* pada kecepatan 3 knot

4.2 Strain pada pelat kapal

Ketika kapal mengalami tubrukan, pelat akan mengalami regangan dan pada suatu titik akan patah. Gambar 4.5 menunjukkan regangan yang dialami pelat yang sama pada beberapa variasi simulasi berbeda.

Gambar 4.5 menunjukkan perubahan *strain* pada pelat tiap satuan waktu pada setiap variasi dari simulasi.

Grafik tersebut menunjukkan bahwa pelat kapal pada tubrukan terhadap *jetty* yang terapkan *fender* mengalami *strain* yang lebih kecil. Pelat mengalami robek hanya pada tubrukan *jetty* tanpa *fender* dengan sudut 90 derajat diperlihatkan satu-satunya pada grafik yang mencapai *strain* 0,2 yang merupakan titik *failure strain* pada pelat kapal. Namun demikian, tingkat kerusakan berupa robekan pelat hanya terjadi pada area sekitar linggi haluan kapal dan tidak mencapai area sekat haluan. Hal ini memungkinkan kapal tetap dalam keadaan mengapung meskipun area fore peak tank mengalami kebocoran.

Strain pada detik kelima pada simulasi tubrukan 90 derajat terhadap *jetty* tanpa *fender* sebesar 0,2 sedangkan pada *jetty* dilengkapi *fender* bernilai lebih kecil yaitu 0,17. Selain itu, pada tubrukan sudut 45 derajat terhadap *jetty* tanpa *fender* bernilai 0,1 dan 0,12 untuk sarat 3 m dan *jetty* dilengkapi *fender* senilai 0,07 dan 0,1 untuk sarat 3 m.

4.3 Energi Kinetik

Tabel 4.2 menjelaskan nilai energi kinetik pada detik 0 (E_{k0}) dan detik 5 (E_{k1}) dari simulasi tubrukan. Pada kecepatan yang sama, kapal memiliki energi kinetik awal yang relatif sama juga, namun energi kinetik saat mencapai detik kelima dari simulasi menunjukkan bahwa energi kinetik dari kapal yang menabrak *jetty* dengan *fender* relatif lebih besar dari pada kapal yang menabrak *jetty* tanpa dilengkapi *fender*.

Perbedaan perubahan energi kinetik pada sudut 90 derajat nampak lebih besar daripada pada sudut 45 derajat. Perbedaan nilai energi kinetik ini disebabkan karena sebagian energi internal kapal terserap oleh *fender* sehingga energi kinetik kapal pada tubrukan dilengkapi *fender* menjadi lebih besar dibandingkan

tubrukan terhadap *jetty* tidak dilengkapi *fender* [12].

Tabel 4.2 Energi Kinetik

θ ($^{\circ}$)	v_0 (Knot)	Tanpa <i>Fender</i>		Dilengkapi <i>Fender</i>	
		E_{k0} (MJ)	E_{k1} (MJ)	E_{k0} (MJ)	E_{k1} (MJ)
90	3	11,54	0,297	11,54	0,647
45	3	11,54	0,455	11,54	0,971

4.4 Validasi

Validasi bertujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan suatu analisa model. Dalam jurnal ini, validasi yang digunakan untuk melihat keakuratan dari simulasi tubrukan kapal MT. KUANG terhadap *jetty* dengan dan tanpa *fender* adalah melalui perbandingan antara perhitungan pada *software* Abaqus 6.14 dengan perhitungan manual melalui rumus.

a. Perhitungan *Software*

Perhitungan gaya tubrukan pada Abaqus disusun dari kontribusi elemen individu yang dapat dilihat pada persamaan (3). Gaya kontak maksimum pada kapal ditunjukkan pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 sebesar 3,081 MN pada sudut 90 $^{\circ}$ dan 1,616 MN pada sudut 45 $^{\circ}$.

Selain itu, perhitungan *software* dapat juga menggunakan energi kinetik. Energi kinetik pada Abaqus menggunakan konversi energi yang diisyaratkan dalam Hukum Termodinamika 1 yang dapat dirumuskan sebagai berikut [8]:

$$\frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + \rho U \right) dV = \int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV \quad (4)$$

Maka dari itu, Energi Kinetik dapat juga dirumuskan sebagai:

$$E_K = \int_V \frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} dV \quad (5)$$

Keterangan:

ρ : *current density*

\mathbf{v} : *velocity field vector*

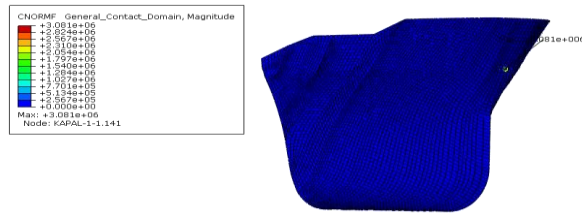
U : *internal energy per unit mass*

\mathbf{t} : *surface traction vector*

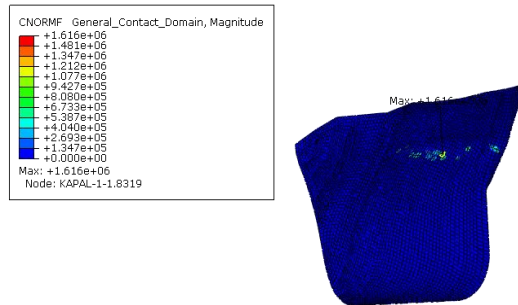
\mathbf{f} : *body force vector*

\mathbf{n} : *normal direction vector on boundary S*

b. Perhitungan Manual



Gambar 4.8 Gaya Kontak Maksimum pada kecepatan 3 knot sudut 90 derajat



Gambar 4.9 Gaya Kontak Maksimum pada kecepatan 3 knot sudut 45 derajat

Rumus perhitungan manual yang digunakan dalam validasi kali ini adalah rumus perhitungan energi kinetik pada tubrukan kapal atau persamaan (1).

Perhitungan manual dengan persamaan (1) menghasilkan nilai energi kinetik sebesar 11,537 MJ sedangkan perhitungan *software* Abaqus menunjukkan nilai sebesar 11,512 MJ yang mengartikan *margin error* hanya senilai 0,22%.

Selain melalui energi kinetik, validasi juga dapat dilakukan melalui perhitungan gaya kontak kapal. Namun, perhitungan gaya kontak hanya dapat dilakukan pada *jetty* yang tidak dilengkapi *fender*. Perhitungan nilai gaya kontak dapat menggunakan rumus pada persamaan sebagai berikut [7].

$$R = \frac{F_{max} = t_{avg} R \eta v \sqrt{KM}}{\text{volume area} \times \text{Density}} \quad (6)$$

Keterangan:

- F_{max} : Gaya Tubrukan Maksimum (N)
- t_{avg} : Ketebalan Pelat (10 mm)
- v : Kecepatan kapal (3 m/s)
- η : Efisiensi energi yang diserap berkaitan dengan koefisien gesek dan sudut tubrukan (baja – beton = 0,15)
- K : *Equivalent Stiffener* (15 MN/m)
- M : *displacement* kapal (9.134.211 kg)
- R : Koefisien *Rigidity* (0,025 – 0,1)

Perbandingan hasil analisa *software* dengan perhitungan rumus (6) menghasilkan koreksi eror 0,02% untuk simulasi 90 dan 4,65% untuk simulasi 45. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel Validasi Gaya Tubrukan pada sampel tubrukan terhadap *jetty* tidak dilengkapi *fender*.

Tabel 4.3 Gaya Tubrukan

No.	Sudut (°)	Kecepatan (Knot)	Hasil Analisa <i>Software</i> (MN)	Hasil Perhitungan (MN)	Koreksi Error (%)
1.	90	3	3,081	3,082	0,02%
2.	45	3	1,616	1,540	4,65%

Karena *margin error* berada dibawah 10%, maka dapat disimpulkan bahwa simulasi valid.

5. KESIMPULAN

Penelitian simulasi tubrukan kapal MT. KUANG terhadap *jetty* dengan dan tanpa *fender* bertujuan membandingkan tingkat kerusakan pada haluan kapal dengan variasi kecepatan dan sudut datangnya kapal terhadap *jetty*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kecepatan dan sudut yang sama, penambahan *fender* pada *jetty* menghasilkan tingkat kerusakan terhadap kapal menjadi lebih kecil yang ditunjukkan dengan adanya robekan pada

pelat haluan kapal di simulasi tubrukan terhadap jetty tidak dilengkapi fender. Sedangkan pada simulasi tubrukan terhadap jetty dilengkapi fender, pelat kapal hanya mengalami deformasi.

Tingkat kerusakan pada badan kapal juga dapat dilihat dari perbedaan nilai *strain* yang dialami pelat kapal. *Strain* pada detik kelima pada simulasi tubrukan 90 derajat terhadap jetty tanpa *fender* sebesar 0,2 sedangkan pada jetty dilengkapi *fender* bernilai lebih kecil yaitu 0,17. Selain itu, pada tubrukan sudut 45 derajat terhadap jetty tanpa *fender* bernilai 0,1 dan 0,12 untuk sarat 3 m dan jetty dilengkapi *fender* bernilai 0,07 dan 0,1 untuk sarat 3 m. Tingkat kerusakan berupa robekan pelat hanya terjadi pada area sekitar linggi haluan kapal dan tidak mencapai area sekat haluan. Hal ini memungkinkan kapal tetap dalam keadaan mengapung meskipun area fore peak tank mengalami kebocoran.

Penambahan variasi pada kecepatan dan sudut datangnya kapal tetap menunjukkan hasil yang sesuai dengan penelitian terkait tubrukan yang membuktikan bahwa penambahan *fender* pada jetty dapat mengurangi tingkat kerusakan tubrukan terhadap badan kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hasugian, A. I. S. Wahyuni, M. Rahmawati and Arleiny, "Pemetaan Karakteristik Kecelakaan Kapal di Perairan Indonesia Berdasarkan Investigasi KNKT," *Warta Penelitian Perhubungan*, pp. 229-240, 2018.
- [2] H. Leheta, A. Elhewy and W. E. S. Mohamed, "Finite Element Simulation of Barge Impact into a Rigid Wall," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 11-21, 2014.
- [3] O. Mursid, I. P. Mulyatno and G. Rindo, "Analisa Tubrukan pada Lambung Kapal Self Propelled Oil Barge (SPOB) 5000 Dwt dengan Jetty Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 3, no. 4, pp. 514-523, 2015.
- [4] R. Agustian, I. P. Mulyatno and H. Yudho, "Analisa Tubrukan pada Lambung Kapal Accomodation Work Barge (AWB) 5640 Dwt dengan Jetty Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 4, no. 3, pp. 675-684, 2016.
- [5] P. T. Pedersen and Y. Li, "On the Global Ship Hull Bending Energy in Ship Collisions," *Marine Structures*, vol. 22, pp. 1-11, 2009.
- [6] O. Kitamura, "FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage," *Marine Structures*, vol. 15, pp. 403-428, 2002.
- [7] A. AbuBakar and R. Dow, "The Impact Analysis Characteristics of a Ship's Bow During Collisions," *Engineering Failure Analysis*, vol. 100, pp. 492-511, 2019.
- [8] M. Berkelaar, *Abaqus Theory Manual*, Michigan: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 1991.
- [9] K. Lee, "Effects on the Various Rubber Fenders of a Tripod Offshore Wind Turbine Substructure Collision Strength due to Boat," *Ocean Engineering*, vol. 72, pp. 188-194, 2013.
- [10] C. Liu, E. Hao and S. Zhang, "Optimization and Application of a Crashworthy Device for the Monopile Offshore Wind Turbine Against Ship Impact," *Applied Ocean Research*, vol. 51, pp. 129-137, 2015.
- [11] G. Li, Y. Zhao, S.-S. Pang and Y. Li, "Effective Young's Modulus Estimation of Concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1455-1462, 1999.
- [12] H. Jiang and M. G. G. Chorzepa, "Evaluation of a New FRP Fender System for Bridge Pier Protection against Vessel Collision," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 20, pp. 1-12, 2014.