



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

ANALISIS TUBRUKAN PADA HALUAN KAPAL SPOB ADELINE 1459GT DENGAN OIL TANKER MT KUANG 5263GT MENGUNAKAN ELEMEN HINGGA

Joevero Risqy Suvica^{*)}, 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 :thejoe001@gmail.com,

Abstrak

Tubrukan merupakan pertemuan antara dua benda dalam sesuatu peristiwa, dimana dalam tubrukan kapal dapat menimbulkan terbentuknya deformasi sampai robeknya lambung kapal. Tubrukan kapal merupakan peristiwa yang sangat merusak bagi kapal dan lingkungan sekitar. Dengan sering terjadinya tubrukan kapal di perairan Indonesia, maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan memprediksi kerusakan kapal akibat tubrukan tersebut.

Penelitian tubrukan haluan kapal SPOB ADELINE 01 1459 GT dengan lambung kapal MT. KUANG 5263 GT menggunakan metode elemen hingga dengan software Abaqus 6.14. Penelitian ini menggunakan 2 variasi sudut dan 3 variasi kecepatan. Ketebalan pelat yang digunakan yaitu 10 mm, dengan variasi kecepatan 3 knot, 4 knot dan 6 knot sedangkan variasi sudut 30° dan 90°. Hasil Analisa menunjukkan besar energi kinetik yang dihasilkan dalam masing-masing kecepatan dengan variasi sudut 30° secara berturut - turut 4.57×10^6 J, 8.00×10^6 J, dan 1.79×10^7 J sedangkan untuk variasi sudut 90° secara berturut – turut 4.63×10^6 J, 8.01×10^6 J dan 2.21×10^7 J. Analisa unttuk nilai plastic strain maksimum pada kecepatan 3 knot adalah 0.04, dan 0.0576 pada kecepatan 4 knot 0.0485 dan 0.0606 dan pada kecepatan 6 knot 0.0521, dan 0.1159. Hasil analisa menunjukkan kerusakan pada badan kapal akan bertambah dengan bertambahnya kecepatan dan arah sudut 90° menjadi sudut termaksimal. Sehingga dengan ditambahkannya kecepatan dan keadaan tubrukan kearah sudut 90° akan memberikan kerusakan dan deformasi yang terbesar pada kapal.

Kata Kunci : *Crushing force, Plastic strain, Abaqus 6.14*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan luas permukaan lautnya lebih besar dari daratan, terbukti dengan adanya garis pantai di sebagian besar pulau-pulainya, menjadikan Indonesia sebagai negara kedua yang memiliki garis pantai terpanjang di dunia.

Tapi kerana potensi tersebut Perairan Indonesia memiliki lalu lintas pelayaran laut

yang tinggi, 90% pengangkutan kargo dilakukan lewat jalur laut dan hampir 40-50% pelayaran perdagangan laut dunia melewati perairan yang menyinggung Indonesia. Tingginya lalu lintas pelayaran laut tersebut juga mengakibatkan peningkatan kemungkinan terjadinya kecelakaan tubrukan kapal[1].

Tubrukan merupakan salah satu resiko pelayaran laut yang sering terjadi. Tubrukan kapal dapat berupa tubrukan antara kapal dengan kapal (*Head to head*), bersinggungan kapal, ataupun tubrukan kapal dengan benda-benda tidak bergerak[2].

Tubrukan kapal juga merupakan peristiwa yang sangat merusak bagi kapal maupun ekosistem di lingkungan sekitar. Menurut Lyoyd Register (1995), dari data peristiwa tenggelamnya kapal hampir setengahnya diakibatkan oleh tubrukan kapal. Tubrukan kapal dapat menimbulkan tekanan pada konstruksi kapal sehingga dapat menyebabkan deformasi dan kerusakan pada kekuatan struktur kapal. Kerusakan tersebut mengakibatkan robeknya lambung kapal serta terjadinya tumpahan minyak pada lingkungan sekitar. Tumpukan minyak tersebut selain dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem lingkungan sekitar juga merugikan secara ekonomi karena membutuhkan biaya yang besar untuk membersihkannya[3], [4].

Salah satu contoh peristiwa tubrukan kapal dengan benda tidak bergerak adalah saat Kapal Luno menabrak *jetty* di barat daya Prancis pada 5 Februari 2014. Tubrukan tersebut terjadi karena gekombang besar yang menghantam kapal pada saat mesin kapal dalam keadaan mati. Sedangkan contoh peristiwa tubrukan kapal dengan kapal terjadi pada kapal tongkang bermuatan debu granite yang ditarik oleh kapal TB Indah Laut dengan kapal MV Segero di kepulauan Riau pada 15 Januari 2021 lalu[5].

Dengan adanya peristiwa tubrukan yang terjadi di pelabuhan - pelabuhan maka penting dilakukan penelitian yang bertujuan untuk memprediksi kerusakan yang diakibatkan oleh tubrukan kapal di wilayah pelabuhan tersebut. Maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kerusakan pada Haluan kapal ADELIN 01 saat menubruk lambung kapal MT. Kuang.

Dengan diketahuinya kerusakan pada kapal tersebut diharapkan dapat mencegah atau mengurangi kerusakan saat terjadinya tubrukan kapal.

2. DASAR TEORI

2.1 Konsep Tubrukan Kapal

Kapal bertubrukan dalam keadaan mesin mati. Saat bertubrukan, kapal MT KUANG di asumsikan sebagai objek yang tidak bergerak, sedangkan kapal ADELIN 01 diasumsikan sebagai benda bergerak. Tubrukan terjadi dengan kecepatan kapal 3 knot, 4 knot dan 6 knot dengan sudut elevasi 30° dan 90° dalam waktu 5 detik.

2.2 Energi Kinetik

Energi kinetik adalah energi gerak, energi yang dimiliki benda atau objek karena geraknya. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung total energi kinetik yang terjadi[6] :

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

Keterangan :

E = Energi Kinetik (N)

m = Massa benda/kapal (kg)

a = 1,1 (untuk tubrukan depan atau belakang)

V = Kecepatan tubrukan (m/s)

2.3 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah merupakan salah satu metode yang dapat menggambarkan karakteristik kekuatan suatu struktur yang dapat. Proses inti MEH adalah membagi system yang kompleks menjadi bagian (elemen) kecil sehingga solusi yang kompleks dapat diperoleh dari penggabungan solusi-solusi tiap elemen. MEH dapat diterapkan melalui dua cara yaitu metode tradisional dan komputasi. Metode yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan metode komputasi dengan software ABAQUS[7][8].

2.4 Gaya Impact

Impact adalah sebuah tubrukan dua benda yang terjadi dalam waktu yang singkat dan dua benda tersebut saling memberikan gaya yang relatif besar. Gaya *impact* dapat dihitung dengan persamaan berikut[9][10] :

$$F = V \cdot \sqrt{c \cdot a \cdot m} \quad (2)$$

Keterangan :

F = gaya impact (MN)

c = kekakuan dari tubrukan MN/m)

a = koefisien massa tambah

m = *displacement* (kg)

v = kecepatan relatif (m/s)

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian berupa memilih suatu kasus tubrukan antara kapal dan disimulasikan dengan Abaqus v6.14 sesuai dengan data kecepatan, material, dan sebagainya.

Dalam melakukan penelitian data didapat dari galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang dan PT. Dutabahari Menara Line berupa gambar *lines plan*, RU, *Profil Contruction*. Ukuran utama kapal dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data kapal yang akan digunakan dalam pengujian tubrukan

DATA KAPAL		
Nama kapal	MT. KUANG	ADELIN 01
Tipe kapal	<i>Crude oil tanker</i>	<i>Self Propeled Oil Barge</i>
LOA	104,7 M	71.15 M
LPP	99,00 M	66.4 M
<i>Breadth</i>	18,80 M	16.80 M
<i>Depth</i>	9,50 M	4.40 M
CB	0,798	0.9
<i>Speed</i>	12 knot	10 Knot
<i>Displacement</i>	9.687.799 Kg	3.749.121 Kg
<i>Class</i>	BKI	BKI

3.2 Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh kemudian diolah dengan tahapan sebagai berikut :

a) Part

Tahap ini berisi proses pembuatan model

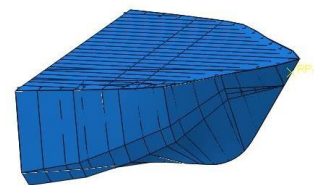
kapal menggunakan software rhinoceros untuk membuat model dan di *convert* ke Abaqus v6.14.

Sebelum di *convert*, model terlebih dahulu diberi elemen dan *constant*. Berikut merupakan jenis elemen dan *real constant* yang di gunakan pada Tabel 3.2. Setelah diberi elemen dan *real constant*, model yang telah dibuat di Rhino di *convert* ke Abaqus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan 3.2

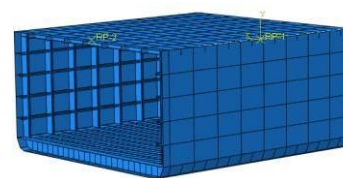
Tabel 3.2 Pendefinisian Elemen

Nama	Jenis Elemen	Real Constant	
		Tipe	Nilai
Badan	Shell	Ketebalan	10 mm
Kapal		<i>Surface</i>	
Massa	Mass	Massa	
Kapal		Kapal	

Dapat dilihat pada table bahwa elemen yang dipilih adalah elemen shell, yaitu elemen yang digunakan untuk memodelkan pelat karena terdapat beban yang menyebabkan momen lentur pada model.



Gambar 3.1 Haluan Kapal ADELIN



Gambar 3.2 Lambung Kapal MT.Kuang

b) property

Data pada Tabel 3.2. merupakan parameter material baja kapal yang digunakan. Data parameter yang dibutuhkan adalah massa jenis, *yield stress*, *fracture strain*, *Young's modulus*, *Poisson ratio*.

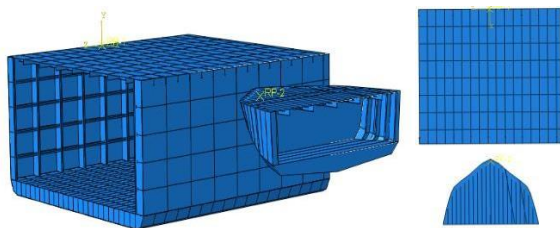
Tabel 3.2 Parameter Material Kapal

Parameter Material	
Density (kg/m ³)	7850
Young's modulus (N/m ²)	2,1 x 10 ¹¹
Poisson ratio	0,3
Yield Strength (N/m ²)	4,3 x 10 ⁸
Fracture strain	0,2

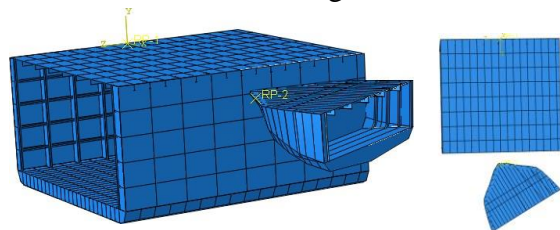
c) assembly

Dalam tahap ini dua model di gabungkan dengan mengaplikasikan variasi terhadap simulasi tubrukan yang sudah dibuat modelnya, variasi yaitu sudut elevasi tubrukan kapal di buat 30° dan 90° dengan kecepatan 3 knot, 4 knot,dan 6 knot.

Pada Gambar 3.3 dan 3.4 dapat diperhatikan penempatan letak lambung kapal MT Kuang dan haluan kapal ADELINE. Lambung kapal MT Kuang diambil bagian PMB (*Pararel Midle Body*) diletakkan secara melintang dan haluan kapal ADELINE diletakkan secara memanjang dan diposisikan menghadap sisi kanan (*starboard*) lambung kapal MT. Kuang. Haluan tersebut kemudian diposisikan sudutnya sesuai dengan variabel yaitu sudut 90° dan 30°.



Gambar 3.3 Model tubrukan haluan kapal ADELINE dengan sudut 90°



Gambar 3.4 Model tubrukan Haluan kapal ADELINE dengan sudut 30°

d) Step

Langkah ini terkait dengan prosedur khusus yang menentukan waktu dan ketentuan yang akan dilakukan selama langkah tersebut, Dengan menentukan berapa *time period* dan *scaling factor*.

e) interaction

Langkah ini adalah proses untuk menentukan kontak antara banyak atau semua wilayah model dengan satu interaksi. Dengan interaksi kontak umum ditentukan untuk permukaan yang mencakup Haluan model kapal.

f) load

Pada tahap ini model ditentukan beban distribusi berupa pemberian *velocity* dan *boundary condition* sesuai dengan variasi yang telah di tentukan dengan kecepatan 3 knot,4 knot,dan 6 knot dan BC kapal MT.Kuang berada pada bagian Port Side dan untuk kapal ADELINE berada dibelakang haluan.

g) Meshing

Meshing adalah proses analisis dimana objek penelitian akan dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung untuk proses simulasi. Tipe *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *structured mesh* dimana model yang dilakukan meshing memiliki struktur yang teratur dan rapi. Tipe *structured mesh* memiliki durasi meshing yang lama tapi hasil perhitungannya lebih akurat.

h) Job dan visualization

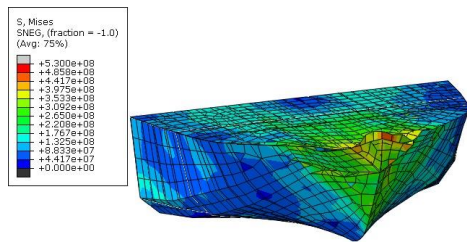
Pada tahapan ini memungkinkan untuk melihat dan mengedit data input sebelum memulai analisis, tahap berikutnya setelah *job* selesai dapat melihat hasil dari proses analisis simulasi tubrukan setelah proses selesai berupa data ditahapan *visualization*.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

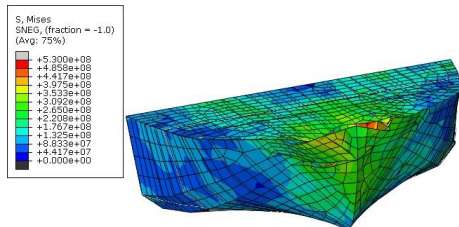
Pada penelitian ini menganalisa kerusakan pada haluan kapal akibat bertubrukan dengan dermaga ketika akan berlabuh ke dermaga. dengan proses analisa dan simulasi berupa berapa besar dampak tubrukan akibat

perubahan arah dari sudut dan kecepatan dari proses berlabuhnya kapal dengan variasi sudut 90° , 30° dan kecepatan 3 knot, 4 knot dan 6 knot.

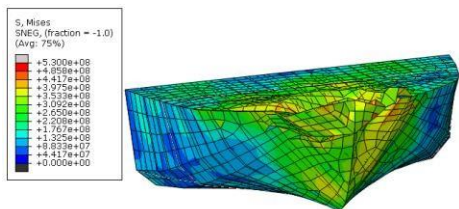
4.1 Kerusakan tubrukan pada haluan kapal berdasarkan sudut dan kecepatan dalam simulasi Abaqus 6.14



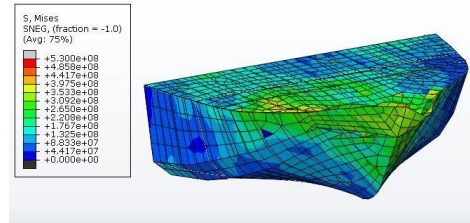
Gambar 4.1 tubrukan kecepatan 3 knot sudut 90°



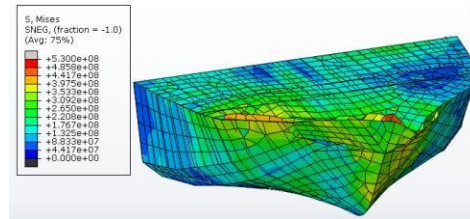
Gambar 4.2 tubrukan kecepatan 4 knot sudut 90°



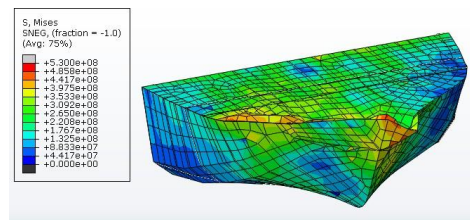
Gambar 4.3 tubrukan kecepatan 6 knot sudut 90°



Gambar 4.5 tubrukan kecepatan 3 knot sudut 30°



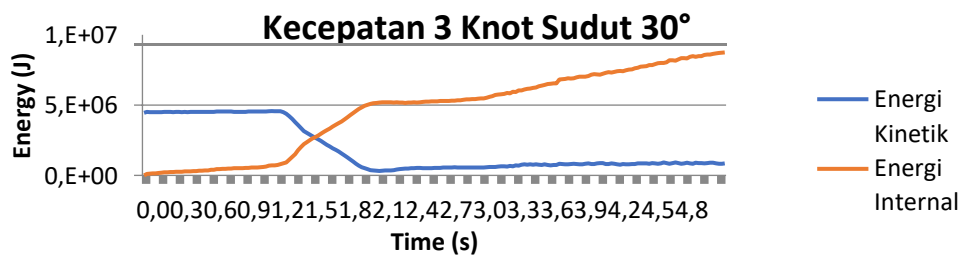
Gambar 4.6 tubrukan kecepatan 4 knot sudut 30°



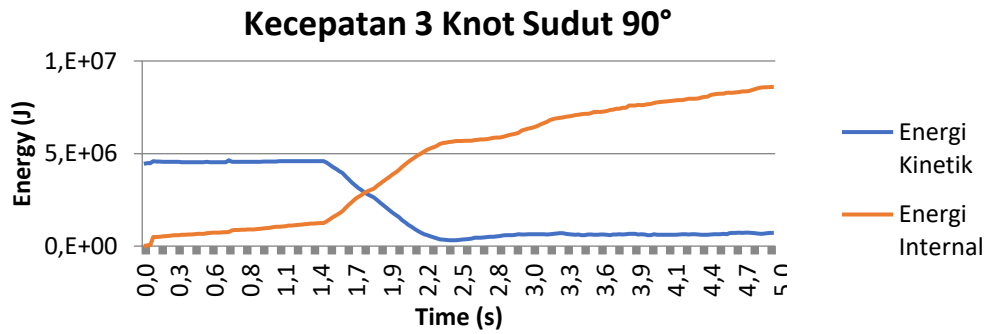
Gambar 4.7 tubrukan kecepatan 6 knot sudut 30°

Berdasarkan Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.3 terlihat bahwasannya kerusakan Haluan kapal pada sudut 90° lebih besar dari sudut 30° . Kerusakan Haluan juga akan semakin besar jika kecepatan kapal saat tubrukan semakin besar seperti yang di uji cobakan dalam penelitian.

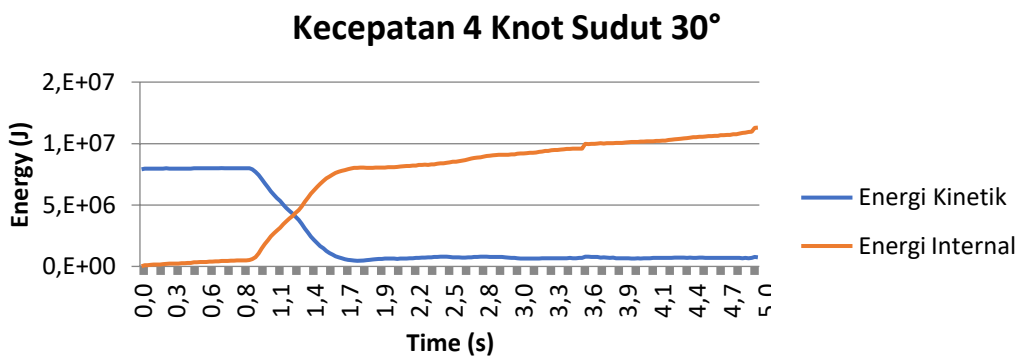
4.2 Besar Energi Berdasarkan Kecepatan Kapal



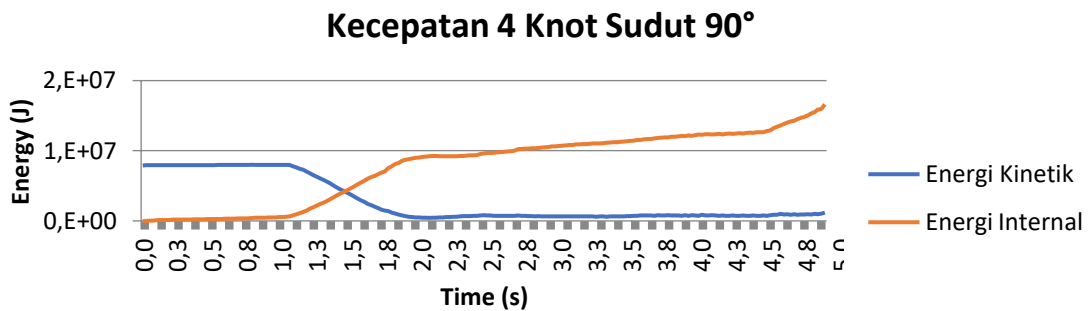
Gambar 4.8 besar energi kinetic dalam kecepatan 3 knot sudut 30°



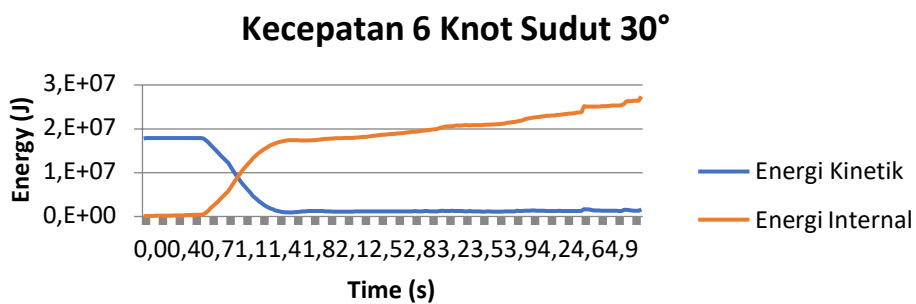
Gambar 4.9 besar energi kinetic dalam kecepatan 3 knot sudut 90°



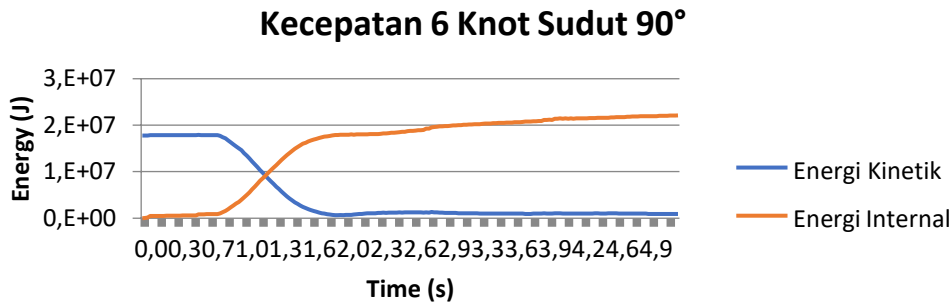
Gambar 4.10 besar energi kinetic dalam kecepatan 4 knot sudut 30°



Gambar 4.11 besar energi kinetic dalam kecepatan 4 knot sudut 90°



Gambar 4.12 besar energi kinetic dalam kecepatan 6 knot sudut 30°



Gambar 4.13 besar energi kinetic dalam kecepatan 6 knot sudut 90°

Energi yang di analisa pada penelitian ini adalah energi kinetic dan energi internal. Energi kinetic adalah energi yang dimiliki oleh sebuah benda karena gerakannya. Energi internal merupakan energi yang diserap oleh badan kapal Ketika tubrukan terjadi. [9]

Pada variasi sudut 90° energi kinetic memiliki nilai yang lebih besar dari pada variasi sudut 30°. Pada gambar 4.8 dan 4.9 besar energi kinetic maksimum yang dihasilkan oleh tubrukan kapal dengan kecepatan 3 knot pada sudut 30° adalah 4,57,E+06 J dan pada sudut 90° sebesar 4,63,E+06 J. Untuk energi internal maksimal adalah 8,74,E+06 J untuk sudut 30° dan 8,59,E+06 J untuk sudut 90°.

Sedangkan pada Gambar 4.10 dan 4.11 dengan kecepatan kapal saat tubrukan sebesar 4 knot energi kinatik terbesar yang dihasilkan pada sudut 30° adalah 8,00,E+06 dan pada sudut 90° yaitu 8,01,E+06. Untuk energi internal maksimal adalah 1,13,E+07 J untuk sudut 30° dan 1,66,E+07 J untuk sudut 90°.

Dan pada Gambar 4.12 dan 4.13 besar energi kinetic pada kapal dengan kecepatan 6 knot, nilai maksimum yang di dapat pada sudut 30° adalah 1,79,E+07 J dan pada sudut 90°

adalah 2,74,E+07 J. Untuk energi internal maksimal adalah 1,79,E+07 J untuk sudut 30° dan 2,21,E+07 J untuk sudut 90°. Perhitungan besar maksimum energi kinetic juga dapat di cari secara manual menggunakan rumus[6].

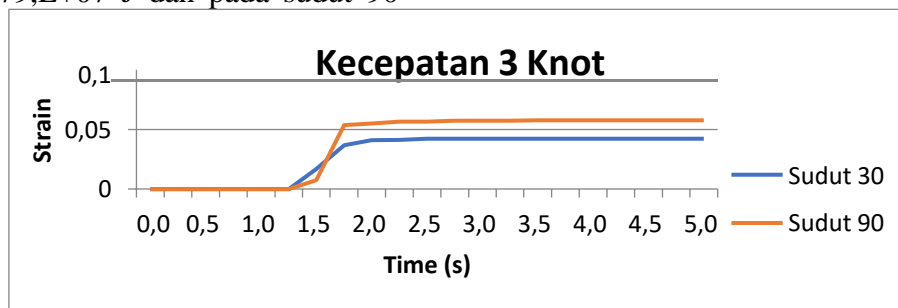
Maka didapatkan hasil perbandingan antara perhitungan rumus dan perhitungan yang didapat dari *software* yang ditampilkan dalam tabel dibawah ini:

Tabel 4.1 Tabel Perhitungan Energi Kinetik

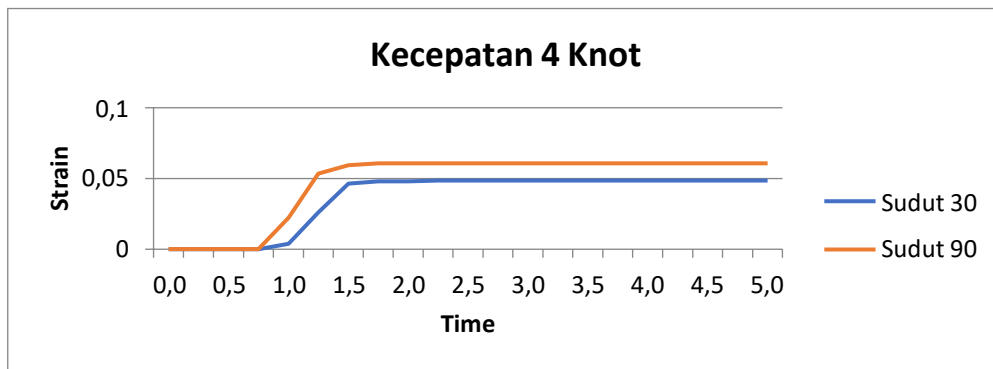
Kecepatan	Hasil Analisa <i>Software</i>	Hasil Perhitungan Manual	Koreksi <i>Error</i> (%)
3 knot	4,63,E+06	4,91,E+06	0.23 %
4 knot	8,01,E+06	8,73,E+06	0.21 %
6 knot	2,74,E+07	1,96,E+07	0.21 %

4.3 Besar *Plastic Strain* Ketika tubrukan

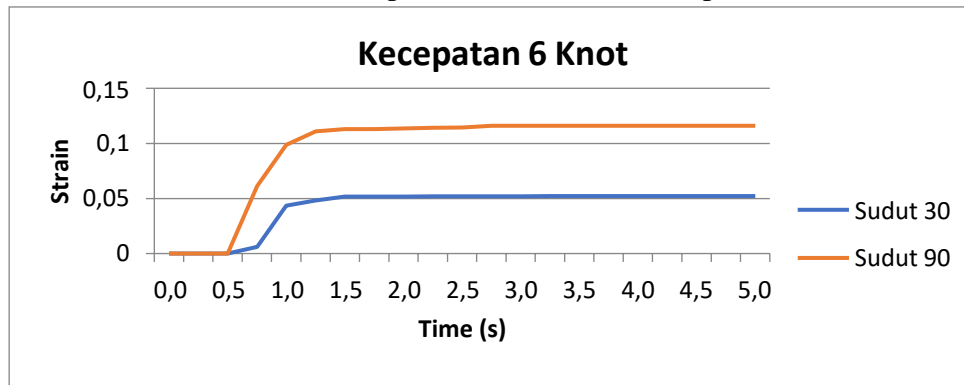
Plastic Strain adalah sebuah regangan dimana material benda tidak kembali ke ukuran dan bentuk aslinya setelah gaya deformasinya dihilangkan[9]. Dan dari hasil analisis yang dilakukan didapatkan besar *plastic strain* yang dihasilkan oleh tubrukan dalam gambar berikut :



Gambar 4.14 besar *plastic strain* dalam kecepatan 3 knot



Gambar 4.15 besar plastic strain dalam kecepatan 4 knot



Gambar 4.16 besar plastic strain dalam kecepatan 6 knot

Dari gambar diatas didapatkan hasil bahwasannya sudut mempengaruhi berapa besar regangan yang dihasilkan. Pada Gambar 4.14 dalam simulasi tubrukkan didapatkan ketika kecepatan kapal sebesar 3 knot dengan sudut 30° memiliki nilai regangan terkecil yaitu 0.042 sedangkan untuk sudut 90° memiliki nilai regangan terbesar yaitu 0.0576. Kemudian pada Gambar 4.15 pada kecepatan 4 knot dengan variasi sudut 30° memiliki nilai regangan yang kecil yaitu 0.0485 dan pada sudut 90° memiliki nilai regangan yang lebih besar yaitu 0.0606. Dan untuk kecepatan 6 knot ditunjukkan Gambar 4.16 dengan sudut 30° memiliki regngan terkecil 0.0521 dan sudut 90° memiliki regangan terbesar yaitu 0.1159.

4.4 validasi

Untuk mengetahui keakuratan suatu model dalam analisa perlu dilakukan sebuah validasi. Cara yang digunakan dalam validasi pada model kapal ADELINe ini dengan

melakukan perbandingan antara perhitungan manual (sesuai dengan rumus) dan hasil perhitungan pada *software*.

a. Perhitungan Manual

Rumus yang digunakan pada perhitungan manual ini yaitu persamaan *crushing force* pada Haluan kapal akibat tubrukkan dengan dermaga dengan rumus sebagai berikut[9] :

$$F_{max} = t_{avg} R \eta V \sqrt{KM} \quad (3)$$

Dimana:

F_{max} = *Crushing Force* maksimal (N).

M = *displacement* kapal (kg).

η = Efisiensi energi yang diserap dalam kaitannya dengan koefisien gesekan dan sudut tumbukan

t_{avg} = Rata-rata ketebalan pelat (10 mm)

K = *Equivalent stiffener* (15E+06 N/m)

V = Kecepatan kapal (m/s)

R = koefisien *Rigidity*

Dengan nilai η besarnya adalah 1,0. Sedangkan koefisien *rigidity* adalah massa area yang terkena tubrukkan/(volume x *density*). Dimana

yang di maksud massa area adalah massa dari haluan dan volume adalah volume model yang terkena tubrukan yaitu bagian Haluan kapal. Koefisien *rigidity* berkisar antara 0,025 – 0,1. Maka didapatkan hasil dari perhitungan Manual dari besar gaya dibawah ini:

$$F_{max} = 480,959,973 \text{ N (Kecepatan 3 knot)}$$

$$F_{max} = 517,825,745 \text{ N (Kecepatan 4 knot)}$$

$$F_{max} = 524,961,229 \text{ N (Kecepatan 6 knot)}$$

b. Perhitungan Software

Perhitungan *Crushing Force* pada Abaqus menggunakan metode analisa *Explicit Dynamic* dengan persamaan integral sebagai berikut [11]:

$$u^N = (M^{NJ})^{-1}(P^J - I^J) \quad (4)$$

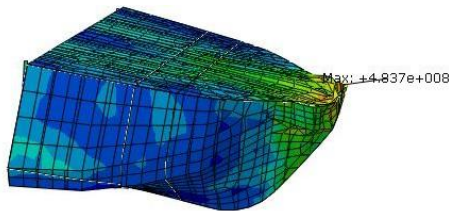
u^N = Degree of freedom

M^{NJ} = Mass matrix

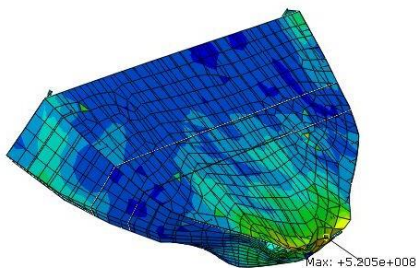
P^J = Load vector

I^J = Force vector

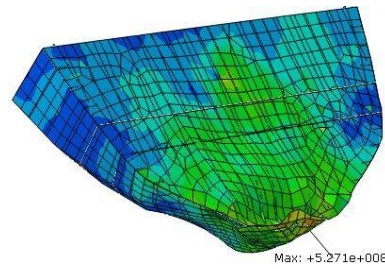
Model pada ketiga variasi kecepatan yaitu 3 knot, 4 knot dan 6 knot, mendapatkan hasil maksimum yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.17 Validasi Menggunakan Software Abaqus pada Kondisi kecepatan 3 knot



Gambar 4.18 Validasi Menggunakan Software Abaqus pada Kondisi kecepatan 4 knot



Gambar 4.19 Validasi Menggunakan Software Abaqus pada Kondisi kecepatan

Hasil validasi menggunakan software mendapatkan bahwa besarnya kecepatan kapal mempengaruhi besar nilai deformasi. Berdasarkan pada Gambar 4.17 besar nilai deformasi yang dihasilkan pada tubrukan kapal pada kecepatan 3 knot adalah 4.837E+08. Sedangkan pada Gambar 4.18 didapatkan bahwa dengan kecepatan 4 knot nilai deformasi yang didapatkan sebesar 5.205E+08. Dan pada Gambar 4.19 menunjukkan nilai deformasi yang didapat pada tubrukan kapal dengan kecepatan 6 knot adalah 5.275E+08.

Maka dapat diketahui perbedaan nilai *Crushing Force* yang di dapat dari rumus dan perhitungan software pada tabel berikut :

Tabel 4.2 Tabel validasi *Crushing Force*

Kecepatan	Hasil Analisa Software	Hasil Perhitungan Manual	Koreksi Error (%)
3 knot	4.837E+08	4.809E+08	0.93%
4 knot	5.205E+08	5.179E+08	0.94%
6 knot	5.275E+08	5.249E+08	0.94%

Dari Tabel 4.2 Dapat dilihat hasil perbandingan antara hasil Analisa menggunakan software dengan hasil perhitungan manual, yang mana dari kedua kondisi tersebut didapatkan nilai error di bawah 5 % sehingga dapat dinyatakan bahwa model tersebut sudah valid.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisis dan simulasi kerusakan haluan kapal ADELINe akibat tubrukan menggunakan program abaqus cae v6.14 pada penelitian ini adalah sudut 90 menjadi sudut termaksimal dalam menghasilkan besar regangan dan energi dari proses terjadinya tubrukan dibandingkan dengan sudut yang lain. Sehingga sudut 90° memberikan kerusakan lebih besar pada struktur kapal dari pada sudut 30°. Kecepatan juga mempengaruhi besarnya deformasi yang dialami kapal. Semakin semakin cepat kecepatan kapal maka semakin besar pula kerusakan yang dialami.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Malisan, "Analisis Kecenderungan Kecelakaan Kapal," *War. Penelit. Perhub.*, vol. 22, no. 1, 2010.
- [2] A. Kuznecovs, M. Schreuder, and J. W. Ringsberg, "Methodology for the simulation of a ship's damage stability and ultimate strength conditions following a collision," *Mar. Struct.*, vol. 79, no. March, p. 103027, 2021, doi: 10.1016/j.marstruc.2021.103027.
- [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," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 3, no. 4, 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," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 3, pp. 675–684, 2016.
- [5] KSOP Tanjung Balai Karimun, "Musibah Tubrukan Kapal Tongkang Tb Indah Laut Dengan Kapal Berbendera Korea Di Kepulauan Riau." <https://hubla.dephub.go.id/home/post/read/9022/ksop-tanjung-balai-karimun-cek-musibah-tubrukan-kapal-tongkang-tb-indah-laut-dengan-kapal-berbendera-korea-di-kepulauan-riau> (accessed Mar. 20, 2021).
- [6] Ekhvan Hendra, "Analisa Modifikasi Struktur Boatlanding pada Fixed Offshore Platform Akibat Tubrukan Crewboat," *ITS, Surabaya*, pp. 1–7, 1999.
- [7] O. Kitamura, "FEM approach to the simulation of collision and grounding damage," *Mar. Struct.*, vol. 15, no. 4–5, pp. 403–428, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0951-8339(02)00010-2.
- [8] SIMULIA, *Getting Started with Abaqus*, vol. 6. 2012.
- [9] A. AbuBakar and R. S. Dow, "The impact analysis characteristics of a ship's bow during collisions," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 100, pp. 492–511, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.02.050.
- [10] W. R. Chang, "An elastic-plastic contact model for a rough surface with an ion-plated soft metallic coating," *Wear*, vol. 212, no. 2, pp. 229–237, Dec. 1997, doi: 10.1016/S0043-1648(97)00148-8.
- [11] S. Zhang, R. Villavicencio, L. Zhu, and P. T. Pedersen, "Impact mechanics of ship collisions and validations with experimental results," *Mar. Struct.*, vol. 52, pp. 69–81, 2017, doi: 10.1016/j.marstruc.2016.12.003.