

Analisis Tegangan Haluan Kapal Akibat Tubrukan

Nur Ahmad Dzikron dan Totok Yulianto

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: totoky@na.its.ac.id; ahmad.dzikron15@mhs.na.its.ac.id

Abstrak—Tubrukan dan karam merupakan salah satu penyebab kecelakaan yang sering terjadi pada kapal. Dampak yang terjadi akibat tubrukan kapal, yaitu dapat mengancam kehidupan manusia, lingkungan, dan investasi ekonomi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan haluan kapal serta mengetahui respon struktur konstruksinya akibat tubrukan dengan *Finite Element Method* (FEM). Simulasi kasus tubrukan kapal dilakukan dengan variasi kecepatan awal haluan 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s selama waktu 0,05 detik. Haluan kapal mengalami deformasi plastis pada saat nilai tegangan melebihi *yield strength* dan mencapai *ultimate strength*, yaitu pada sekitar waktu 0,018 detik; 0,009 detik; dan 0,0056 untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s. *Internal Energy* yang diserap oleh haluan kapal pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s adalah 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ. Gaya maksimal yang dihasilkan pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan awal 1 m/s adalah 10,597 MN dengan penetrasi yang terjadi adalah 39,574 mm. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Kemudian untuk kecepatan awal 3 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Nilai tegangan, *internal energy*, gaya, dan penetrasi yang dihasilkan semakin besar apabila kecepatan awal semakin tinggi.

Kata Kunci—*Strength, Ship Collision, Bow Crushing, FEM*

I. PENDAHULUAN

JUMLAH kecelakaan kapal di dunia, sejak tahun 2007 hingga tahun 2016, sebanyak 1186 kasus dengan 249 kasus berada di Lautan China, Indonesia, dan Phillipines. Dari semua kasus kecelakaan yang terjadi, kecelakaan yang terjadi akibat karam sebanyak 598 kasus dan akibat tubrukan sebanyak 72 kasus. Dengan demikian tubrukan dan karam merupakan salah satu penyebab kecelakaan yang sering terjadi pada kapal [1].

Tubrukan berdampak langsung pada kekuatan struktur kapal sehingga apabila tubrukan terjadi pada kapal pembawa zat berbahaya seperti oil tanker atau LNG/LPG maka akan menyebabkan kerusakan lingkungan yang cukup serius. Berdasarkan data statistik dari *International Oil Pollution Compensation Fund* (IOPCF) pada tahun 2006, tubrukan dan karam bertanggung jawab atas 50% kerusakan lingkungan akibat kebocoran minyak [2]. Selain itu kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan juga bisa menyebabkan kerugian yang sangat besar. Sebagai contoh, yaitu kasus tubrukan yang terjadi di Selat Sunda pada 3 Mei 2014, di antara Pulau Sumatra dan Jawa antara Ro-Ro passenger ship Marisa Nusantara dan reefer Qi Hang yang mengakibatkan kerusakan parah pada ceruk haluan dengan robek sepanjang tujuh meter dan kerugian material lainnya.

Skenario tubrukan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *side collision* (tubrukan sisi) dan *head-on collision* (tubrukan haluan). Kasus *head-on collision* merupakan situasi haluan kapal menabrak objek/bangunan seperti dermaga ataupun menabrak kapal lain. Walaupun *head-on collision* memiliki kemungkinan resiko kerusakan tidak separah *side collision* atau karam, bagaimanapun juga tetap dibutuhkan pencegahan. Oleh karena itu dibutuhkan penelitian untuk mengetahui respon struktur konstruksi haluan kapal akibat tubrukan. Pada penelitian ini diasumsikan kapal pada saat muatan penuh di perairan air tenang.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Teori Impuls-Momentum

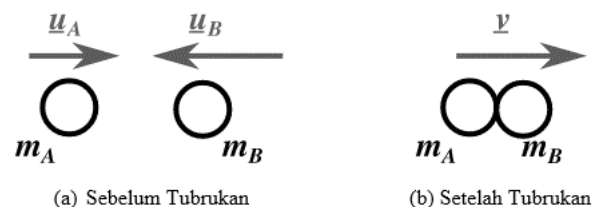
Saat suatu benda dengan massa m dan bergerak dengan kecepatan v maka benda tersebut akan memiliki momentum. Impuls adalah istilah yang digunakan untuk mengukur efek keseluruhan dari gaya yang bekerja dalam suatu interval waktu. Impuls merupakan perubahan momentum yang terjadi pada benda dalam waktu yang singkat. Hubungan impuls dan momentum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$J = F \cdot dt \quad (1)$$

Dengan J adalah impuls, F adalah gaya, dan dt adalah perubahan waktu [3].

B. Tubrukan Inelastis Sempurna

Tubrukan atau *Collision* merupakan kondisi saat suatu objek menabrak objek lainnya. Tubrukan inelastis sempurna adalah peristiwa di mana maksimum energi kinetik hilang selama tubrukan terjadi. Kasus tubrukan seperti ini biasanya terjadi apabila seluruh objek yang berada dalam tubrukan menjadi satu dan memiliki kecepatan yang sama [4].



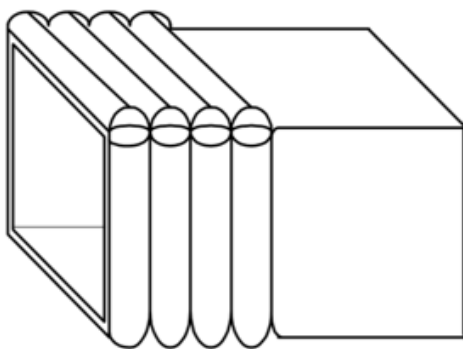
Gambar 1. Ilustrasi tubrukan inelastis sempurna antara partikel A dan partikel B

Gambar 1 menunjukkan kondisi tubrukan inelastis sempurna. Sebelum tubrukan, partikel A dengan massa m_A bergerak menuju partikel B dengan kecepatan u_A , sedangkan partikel B dengan massa m_B bergerak menuju partikel A dengan kecepatan u_B . Setelah terjadi tubrukan, massa kedua partikel menjadi satu dan bergerak dengan kecepatan dan arah yang sama.

C. Tubrukan Kapal

Collision atau tubrukan kapal adalah kecelakaan yang melibatkan kerusakan antar kapal atau satu kapal saja. Kasus tubrukan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *side collision* (tubrukan sisi) dan *head-on collision* (tubrukan haluan). Kasus *head-on collision* merupakan situasi haluan kapal menabrak objek/bangunan seperti dermaga ataupun menabrak kapal lain [5].

Dalam kasus tubrukan, kapal-kapal yang terlibat diklasifikasikan sebagai *striking ship* atau kapal yang menabrak dan *struck ship* atau kapal yang ditabrak [6]. Saat kapal menabrak kapal lain atau suatu struktur seperti dermaga atau *rigid wall*, haluan kapal akan mengalami kerusakan seperti suatu struktur menyerupai balok yang diberi beban axial. Struktur tersebut akan mengalami deformasi berpola lipatan [7]. Ilustrasi deformasi pada struktur balok yang menerima beban aksial dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola lipatan pada struktur kotak di bawah beban axial.

D. Metode Analisis Tubrukan Kapal

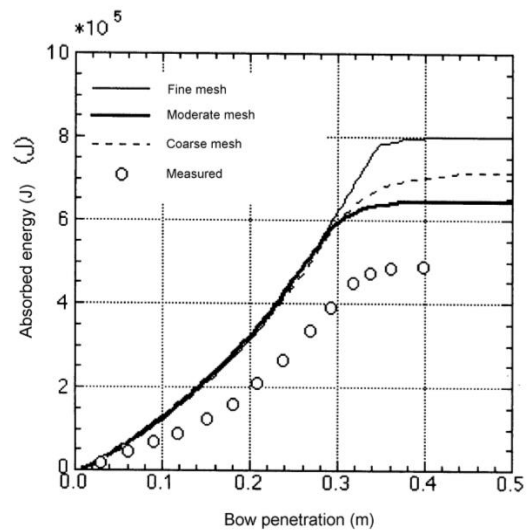
Metode yang sudah ada untuk menganalisis kerusakan struktur kapal akibat tubrukan dapat dibagi menjadi empat kategori, yaitu metode empiris, *finite element method*, eksperimen, dan metode penyederhanaan. Metode empiris sudah diperkenalkan dan dikembangkan oleh beberapa peneliti. Salah satunya adalah Minorsky. Minorsky menganalisis 26 kasus tubrukan kapal dan mengembangkan formula empiris untuk menghitung energi serapan dan kaitannya dengan volume material yang hancur yang dituliskan sebagai berikut:

$$E = 47.2 R_T + 32.7 \tag{2}$$

Dengan R_T adalah *resistance factor*, yaitu volume material yang hancur dari kedua kapal yang menabrak dan ditabrak dan E adalah *absorbed energy*, yaitu energi total yang diserap akibat tubrukan kapal [8]. Formula Minorsky dapat dianggap valid untuk kasus *high-energy collisions*. Oleh karena itu beberapa peneliti lain mengembangkan formula untuk *low-energy collision*. Woisin [9] mengembangkan formula empiris untuk *low-energy collision* berdasarkan eksperimen, sedangkan formula oleh Jones & Wierzbicki [10] dikembangkan berdasarkan teori plastis subjek balok ke *point load*.

Finite Element Method (FEM) adalah salah satu metode yang akurat untuk menganalisis respon struktur kapal akibat tubrukan. Metode ini dianggap dapat memberikan hasil yang akurat dan menggantikan model eksperimen dalam beberapa kasus [11]. Gambar 3 menunjukkan contoh perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi FEM dan eksperimen. Karena

besarnya jumlah elemen dan keharusan untuk menyelesaikan permasalahan dinamis dengan beberapa langkah menyebabkan simulasi *collision* menggunakan FEM memerlukan waktu yang lama.



Gambar 3. Perbandingan Hasil FEM dan Eksperimen Untuk *Impacted Corrugated Panel* oleh Silinder

Haris dan Amdahl [12] melakukan penelitian dengan metode FEM untuk mendapatkan respon struktur kapal akibat tubrukan dengan membagi tiga tipe tubrukan, yaitu tubrukan antara sisi kapal dengan haluan kapal yang rigid, haluan kapal dengan sisi kapal yang rigid, dan tubrukan dengan kedua objek dapat deformasi. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa energi dan gaya tubrukan serta kedalaman penetrasi.

Putranto [13] melakukan penelitian untuk mengkaji penentuan lebar *double skin* untuk kapal *bulk carrier* ditinjau dari *damage collision* dalam rangka untuk tidak mempertimbangkan ruang muat sebagai *damage zone* untuk perhitungan *damage stability*. Hasil yang didapatkan dari simulasi tersebut adalah memahami pengaruh variasi kecepatan terhadap energi dalam yang dihasilkan antara kapal yang bertabrakan.

III. METODOLOGI

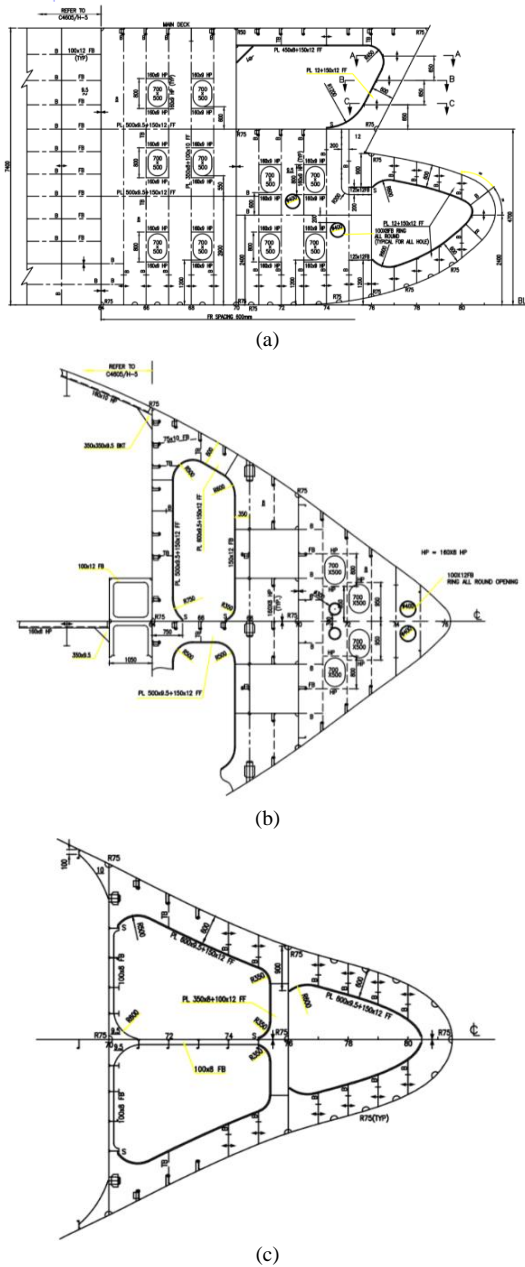
A. Pengumpulan Data

Kapal yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah kapal tanker 3500 LTDW sebagai *striking ship* dan kapal tanker 17500 LTDW sebagai *struck ship*. Data ukuran utama dari kedua kapal tersebut tertera pada Tabel 1.

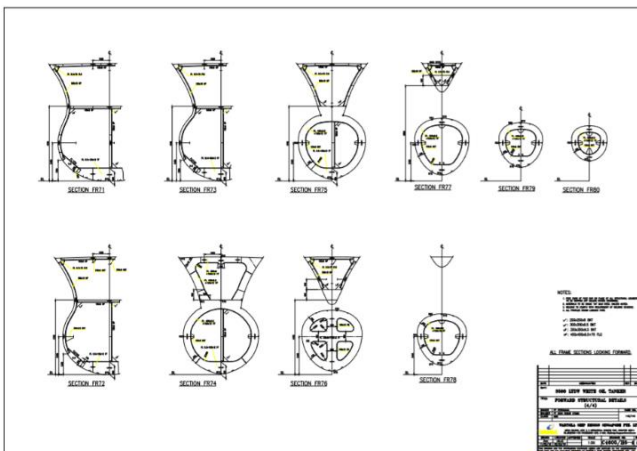
Tabel 1. Data kapal tanker yang digunakan

Ukuran Utama	3500 LTDW	17500 LTDW
Length Overall (LOA)	90 m	157.5 m
Length Construction (LPP)	84 m	149.5 m
Breadth Moulded (B)	15.2 m	27.7 m
Depth Moulded (H)	7.2 m	12 m
Draft (T)	5 m	7.5 m
Service Speed (Vs)	11 knots	13 knots

Data lain yang dibutuhkan adalah *construction profile* dan *frame section* kapal 3500 LTDW. Data ini digunakan untuk pemodelan geometri dari *striking ship*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software 3D*. Data *construction profile* dan *frame section* untuk *striking ship* ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Construction profile kapal 3500 LTDW: (a) centerline profile, (b) horizontal web girder @4700 mm above baseline (c) horizontal web girder @2400 mm above baseline



Gambar 5. Frame section kapal 3500 LTDW frame 70 – 80

Material yang digunakan pada kapal 3500 LTDW adalah baja A36 dengan *mechanical properties* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

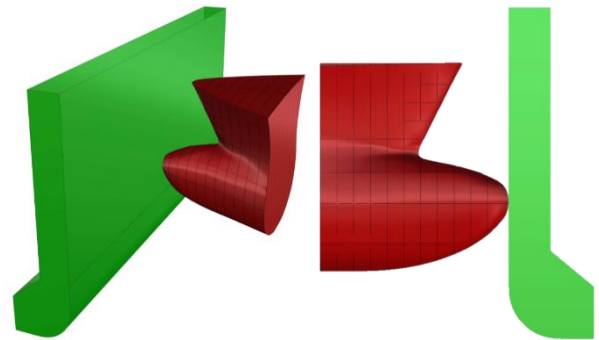
Tabel 2.

Mechanical Properties Baja A36	
Deskripsi	Ukuran
Massa jenis	7850 kg/m ³
Modulus Young	200 GPa
Poisson's ratio	0.26
Shear modulus	79.3 GPa
Bulk Modulus	140 GPa
Compressive Yield Strength	152 MPa

B. Pemodelan Elemen Hingga

Untuk melakukan simulasi tubrukan menggunakan *finite element* dibutuhkan geometri tiga dimensi dari *striking ship* dan *struck ship*. Geometri haluan kapal dibuat berdasarkan data gambar konstruksi yang didapat sebelumnya. Panjang model haluan adalah 9.75 m yang merupakan jarak dari sekat tubrukan hingga ujung *bulbous bow*. Geometri konstruksi haluan dimulai dari *frame 70* hingga *frame 80*.

Karena dalam tugas akhir ini *struck ship* dianggap sebagai *rigid body* maka geometri *struck ship* hanya berupa pelat *wing tank* tanpa konstruksi. Panjang model *wing tank* adalah 21.75 m. Kedua model geometri tersebut diletakkan pada posisi sarat masing-masing tanpa ada jarak antara haluan dengan *wing tank*. Arah haluan *striking ship* tegak lurus *wing tank* kapal yang ditabrak seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil pemodelan 3D dari *striking ship* dan *struck ship*. Posisi *striking ship* tegak lurus terhadap *struck ship*. Tidak ada jarak antara kedua model kapal tersebut.

Pada simulasi tubrukan dengan FEM, berat benda yang dimodelkan dapat memengaruhi hasil. Apabila *striking ship* dimodelkan keseluruhan maka hasil tegangan, *internal energy*, gaya, dan penetrasi yang dihasilkan akan berbeda dengan *striking ship* yang dimodelkan pada bagian haluan saja. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan berat pada model. Oleh karena itu pada penelitian ini hasil yang didapatkan hanya diakibatkan oleh berat model haluan kapal saja.

C. Konvergensi Model

Konvergensi merupakan cara untuk menentukan ukuran elemen yang tepat untuk digunakan dalam simulasi Tabel 3 menunjukkan parameter dan tinjauan konvergensi yang digunakan sebagai input untuk mendapatkan nilai *Stress Equivalent Von-Misses*. Beban yang digunakan adalah *maximum bow collision load* yang didapatkan dengan menggunakan persamaan empiris yang dirumuskan oleh Pedersen [14].

$$P_{bow} = \begin{cases} P_0 \cdot \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \quad (3)$$

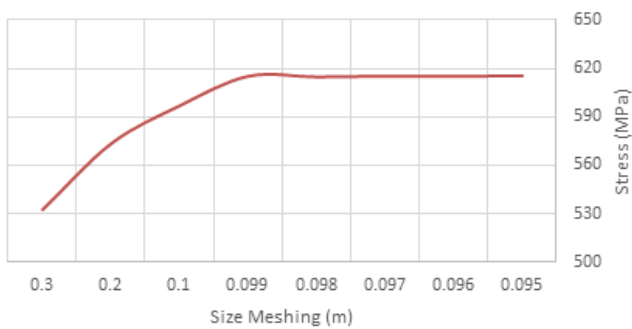
Dengan menggunakan formula di atas didapatkan nilai *maximum bow collision load* sebesar 23,00877 MN yang kemudian diberikan di ujung haluan ke arah sumbu X negatif.

Fixed support diberikan pada *collision bulkhead* bertujuan agar *striking ship* tidak bergerak ke arah manapun sehingga bisa didapatkan nilai tegangan pada titik tinjauan beban, yaitu di *center girder*.

Tabel 3.
Hasil Konvergensi Tegangan

Ukuran Mesh	Jumlah Elemen	Jumlah Nodes	Tegangan (MPa)	Margin (%)
0,3	48641	40466	532,25	-
0,2	65925	55820	573,47	7,188%
0,1	155711	130312	597,16	3,967%
0,099	161699	137218	615,57	2,991%
0,098	163509	139033	615,15	0,068%
0,097	165754	140468	615,69	0,088%
0,096	167274	142078	615,47	0,036%
0,095	169560	144050	615,92	0,073%

Tabel 3 memperlihatkan hasil tegangan yang selanjutnya digunakan untuk konvergensi model. Dapat dilihat jumlah *node* dan jumlah *element* bertambah secara terus menerus. Namun, perubahan nilai tegangan hanya sedikit. Selisih antar simulasi memiliki nilai 7,188% dan terus mengecil hingga 0,036%.



Gambar 7. Kurva konvergensi berdasarkan ukuran meshing yang digunakan.

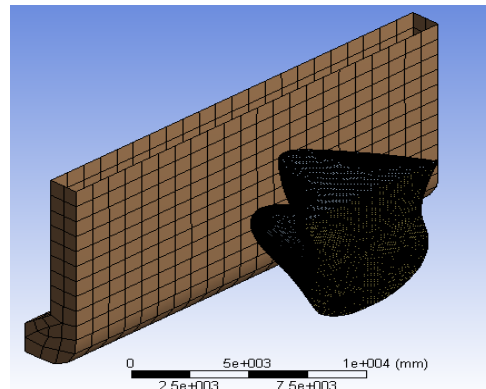
Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa grafik cenderung konstan mulai dari ukuran 0,099 m maka ukuran mesh yang seharusnya digunakan adalah 0,099 m. Namun, dalam penelitian ini ukuran mesh yang kecil dapat membuat perhitungan siklus simulasi semakin kecil sehingga menyebabkan *time step too small error*. Selain itu juga dibutuhkan ukuran mesh yang dapat menghasilkan waktu simulasi yang cukup singkat. Dengan alasan tersebut maka digunakan ukuran mesh 0,2 m dengan selisih hasil dengan ukuran mesh 0,099 adalah 6,84%

D. Kondisi Batas

Beberapa kondisi batas yang digunakan untuk simulasi *dynamic finite element*, yaitu *rigid body*, *connections*, *mesh*, *initial velocity*, *fixed support*, dan *end time*. *Rigid body* didefinisikan pada lambung *struck ship* agar energi diserap 100% oleh konstruksi haluan dan lambung kapal yang ditabrak tidak terjadi deformasi. Pendefinisian *connections* dilakukan otomatis oleh *software*, tetapi ada beberapa koneksi yang harus diperbaiki dan didefinisikan secara manual. Jenis *connections* yang digunakan adalah *bonded*. Ukuran *meshing* yang digunakan sesuai dengan hasil yang didapatkan pada konvergensi, yaitu 0,2 m.

Pada penelitian ini ada tiga variasi yang digunakan, yaitu 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s. Pendefinisian kecepatan diberikan

kepada lambung kapal *struck ship*. Hal ini dikarenakan oleh keterbatasan *software* FEM yang tidak bisa memberikan hasil optimal apabila pendefinisian kecepatan dilakukan pada haluan kapal *striking ship*. Gambar 8. Menunjukkan hasil meshing pada *striking ship* dengan ukuran mesh 0,2 m dan pada *struck ship* dengan ukuran mesh 0,2 m.



Gambar 8. Hasil meshing pada model

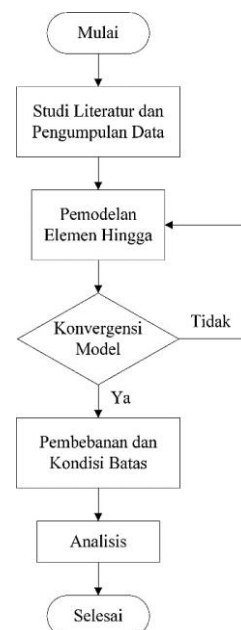
End time adalah waktu yang berlangsung selama proses tubrukan. Nilai *end time* dicari menggunakan persamaan hubungan antara momentum dan impuls

$$F \cdot dt = [(M_A V_{A1} + M_B V_{B1}) - (M_A V_{A2} + M_B V_{B2})] \quad (4)$$

Dengan F adalah *maximum bow collision load*, M_A massa *striking ship*, yaitu 5314,974 ton. Untuk tiga variasi kecepatan, waktu yang dibutuhkan hingga *striking ship* mencapai kecepatan 0 m/s adalah 0,4851 detik. Namun, karena keterbatasan kemampuan komputer maka *end time* yang digunakan adalah 0,05 detik.

E. Diagram Alir

Metode penelitian dalam Tugas Akhir ini digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) dan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram alir pengerjaan penelitian Analisis Tegangan Haluan Kapal Akibat Tubrukan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, analisis kekuatan struktur kapal yang didapatkan dari penyelesaian metode elemen hingga adalah tegangan, energi, gaya, dan penetrasi. Hasil penetrasi dari simulasi FEM kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan formula fisika dasar.

A. Hasil Perhitungan Analitis

Perhitungan analitis digunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan haluan kapal pada waktu 0,05 detik yang kemudian digunakan untuk mencari nilai kedalaman penetrasi yang dihasilkan akibat tubrukan. Untuk mendapatkan nilai kecepatan tersebut, digunakan formula sebagai berikut:

$$F \cdot \Delta t = [(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})] - [(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})] \quad (5)$$

Nilai F adalah *maximum bow collision load* yang didapatkan menggunakan persamaan (3). Untuk kecepatan 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 11,504 MN; 23,009 MN; dan 34,513 MN. Nilai V_{B1} dan V_{B1} adalah 0 karena *struck ship* dianggap diam.

Dengan demikian didapatkan nilai kecepatan *striking ship* pada waktu 0,05 detik dengan kecepatan awal 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 0,897 m/s; 1,794 m/s; dan 2,690 m/s. Dari nilai kecepatan tersebut kemudian didapatkan nilai kedalaman penetrasi menggunakan persamaan prinsip kerja dan energi, yaitu

$$W = \Delta E_k \quad (6)$$

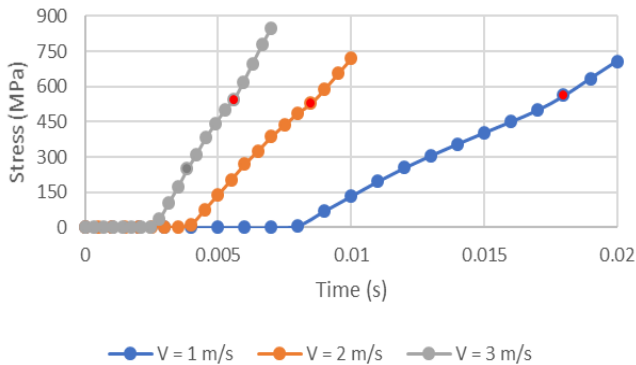
Besar penetrasi yang didapatkan untuk kecepatan awal 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 47,423 mm; 94,846 mm; dan 142,270 mm. Rekapitulasi hasil dari perhitungan analitis ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Analitis

Kecepatan Awal (m/s)	Kecepatan Saat 0,05 detik (m/s)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)
1	0,897	11,504	47,423
2	1,794	23,009	94,846
3	2,691	34,513	142,270

B. Hasil dan Analisis Tegangan

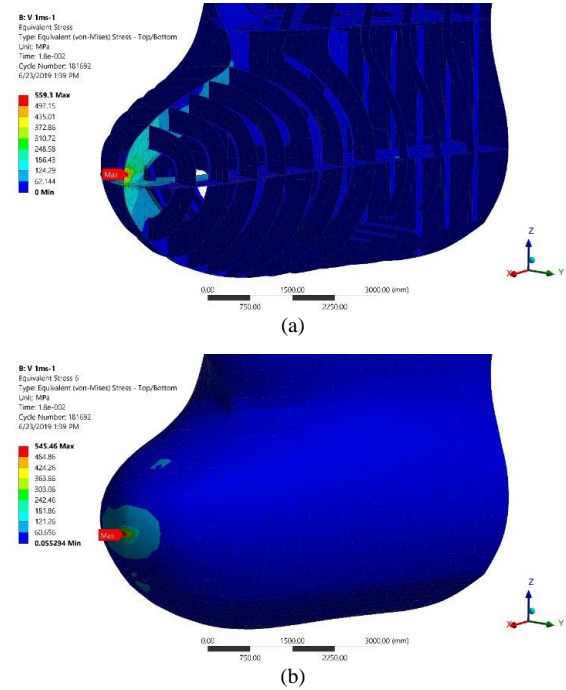
Tegangan yang dihasilkan akibat tubrukan pada simulasi FEM ditunjukkan Gambar 11. Tegangan tersebut merupakan nilai tegangan *von mises* maksimal pada haluan kapal. Nilai tegangan yang ditampilkan mulai dari kapal menabrak hingga mencapai *ultimate strength* material, yaitu 550 MPa.



Gambar 11. Kurva hasil tegangan. Nilai tegangan mencapai *ultimate strength* untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s masing-masing pada sekitar waktu 0,018 detik; 0,009 detik; dan 0,0056.

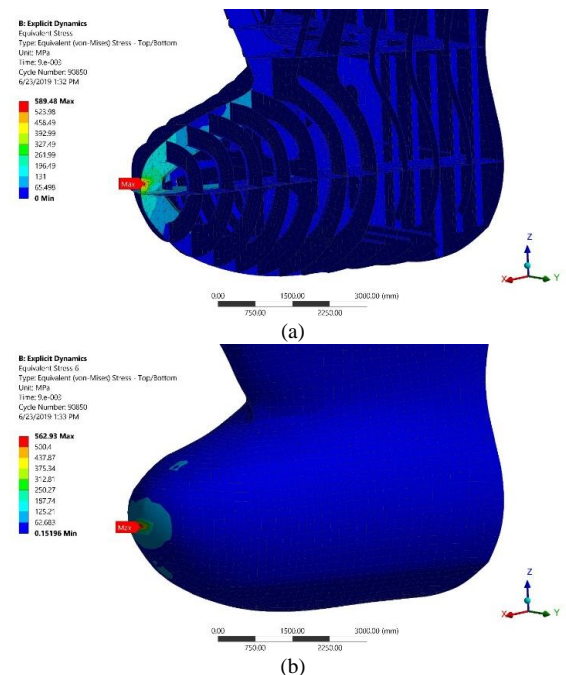
Berdasarkan hasil tersebut, kapal mengalami deformasi elastis dan plastis dalam waktu yang sangat singkat. Semakin tinggi kecepatan awal, semakin cepat tegangan mencapai *ultimate*. Seharusnya kapal pecah saat tegangan melebihi *ultimate*. Namun, *software* FEM yang digunakan tidak dapat menampilkan hasil yang demikian.

Hasil tegangan *von-misses* maksimal untuk kecepatan awal 1 m/s pada waktu 0,018 detik terjadi di bagian konstruksi *center girder* dengan besar tegangan 559,3 MPa. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 12.



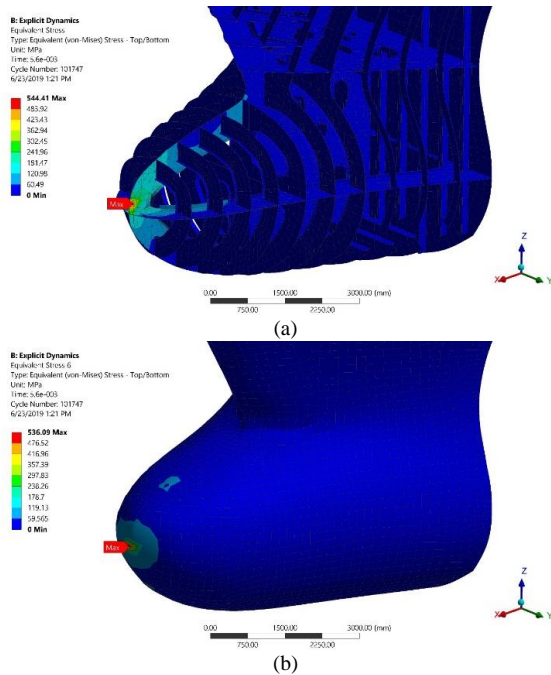
Gambar 12. Tegangan Von-Misses untuk V = 1 m/s: (a) Hasil tegangan pada konstruksi; (b) Hasil tegangan pada pelat

Hasil tegangan *von-misses* maksimal untuk kecepatan awal 2 m/s pada waktu 0,009 detik juga terjadi di bagian konstruksi *center girder* dengan besar tegangan 589,48 MPa. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 13



Gambar 13. Tegangan Von-Misses untuk V = 2 m/s: (a) Hasil tegangan pada konstruksi; (b) Hasil tegangan pada pelat

Hasil tegangan von-misses maksimal untuk kecepatan awal 3 m/s pada waktu 0,0056 detik juga terjadi di bagian konstruksi *center girder* dengan besar tegangan 544,41 MPa. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 14.

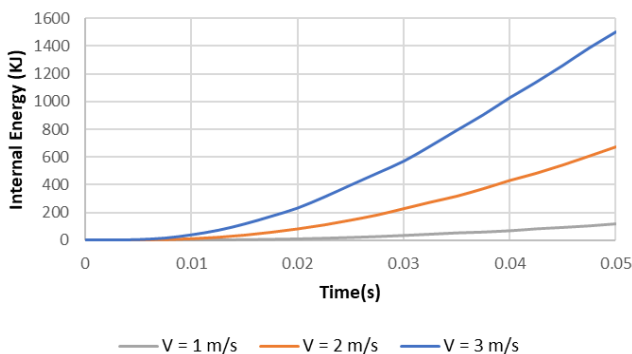


Gambar 14. Tegangan Von-Misses untuk $V = 3$ m/s: (a) Hasil tegangan pada konstruksi; (b) Hasil tegangan pada pelat

Hasil tegangan di setiap kecepatan menunjukkan nilai tegangan pada konstruksi lebih besar dibandingkan tegangan pada pelat. Hal ini terjadi karena konstruksi merupakan penguat sehingga menerima beban lebih besar.

C. Hasil dan Analisis Internal Intergy

Internal energy merupakan energi yang diserap oleh konstruksi haluan. Nilai *internal energy* sama dengan nilai energi kinetik yang hilang saat tubrukan terjadi. Besar *internal energy* yang dihasilkan merupakan hasil dari simulasi dengan *end time* 0,05 detik. Nilai *internal energy* maksimal yang dihasilkan oleh kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s masing-masing adalah 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ.

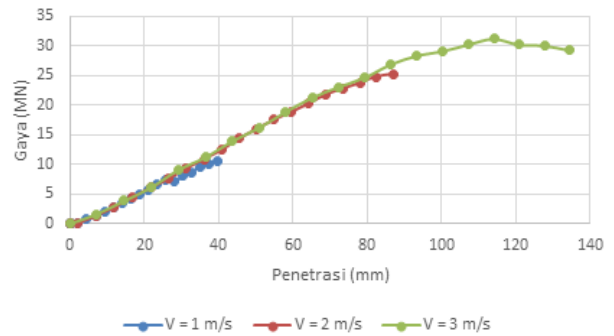


Gambar 15. Kurva *internal energy* yang diserap oleh haluan kapal

Nilai *internal energy* cenderung naik. Energi paling besar diserap oleh haluan saat bergerak dengan kecepatan awal 3 m/s. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi kecepatan maka semakin besar energi kinetik. Oleh karena itu energi yang diserap juga lebih besar dibandingkan dengan kapal yang bergerak dengan kecepatan 1 m/s dan 2 m/s.

D. Hasil dan Analisis Gaya dan Penetrasi

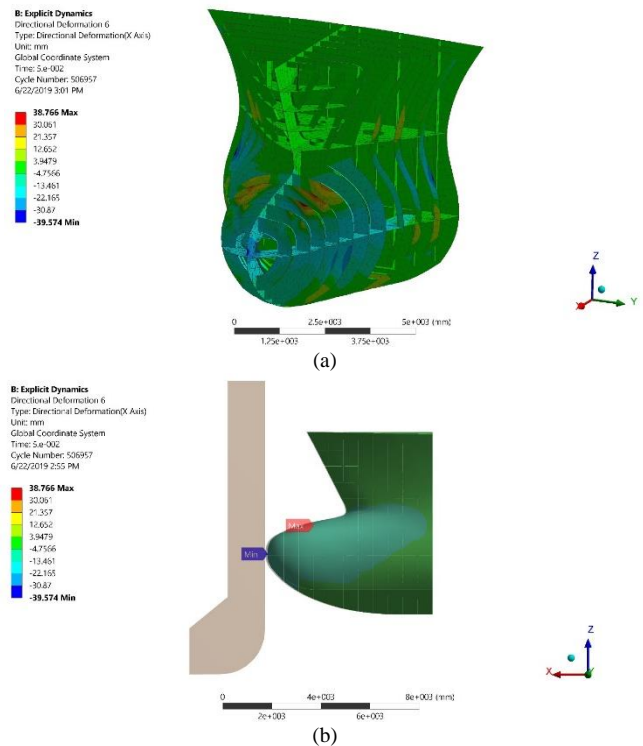
Besar gaya dan penetrasi yang dihasilkan dari simulasi simulasi kasus tubrukan dalam waktu 0,05 detik. Ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Kurva *penetration-force* selama 0,05 detik.

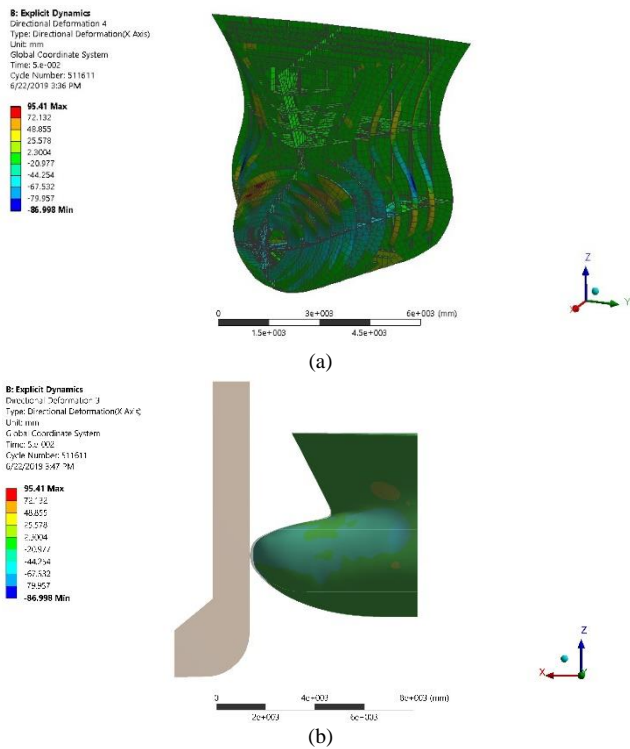
Dalam kasus tubrukan pada haluan ini, terjadi deformasi ke arah sumbu x positif dan negatif. Deformasi ke arah sumbu x negatif merupakan penetrasi yang terjadi pada haluan. Dari kurva di atas dapat dilihat bahwa gaya yang terjadi cenderung naik dan nilai paling besar terjadi pada saat kecepatan awal 3 m/s. Namun, ada suatu kondisi saat gaya yang terjadi cenderung konstan, sedangkan penetrasi tetap naik. Ini merupakan suatu kondisi saat konstruksi kapal mempertahankan kedudukan deformasinya, yaitu saat konstruksi memberikan penguatan.

Besar gaya yang diterima haluan pada waktu 0,05 detik dengan kecepatan awal 1 m/s adalah 10,597 MN dengan penetrasi 39,574 mm. Perubahan bentuk haluan ditunjukkan pada Gambar 17(b).



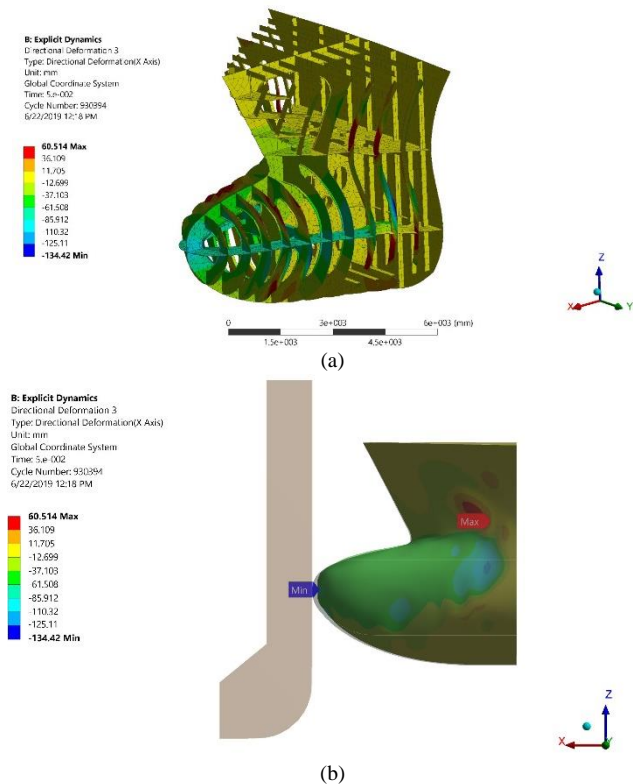
Gambar 17. Hasil deformasi untuk $V = 1$ m/s: (a) Deformasi pada konstruksi; (b) perubahan bentuk haluan kapal

Besar gaya yang diterima haluan pada waktu 0,05 detik dengan kecepatan awal 2 m/s adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Perubahan bentuk haluan ditunjukkan pada Gambar 18(b).



Gambar 18. Hasil deformasi untuk $V = 2$ m/s: (a) Deformasi pada konstruksi; (b) perubahan bentuk haluan kapal

Besar gaya yang diterima haluan pada waktu 0,05 detik dengan kecepatan awal 3 m/s adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Perubahan bentuk haluan ditunjukkan pada Gambar 19(b).



Gambar 18. Hasil deformasi untuk $V = 3$ m/s: (a) Deformasi pada konstruksi; (b) perubahan bentuk haluan kapal

E. Komparasi Hasil

Nilai penetrasi yang dihasilkan dari simulasi FEM dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan formula fisika dasar. Nilai yang dibandingkan

merupakan besar penetrasi terbesar, yaitu pada waktu 0,05 detik untuk masing-masing kecepatan awal.

Tabel 5. Data kapal tanker yang digunakan

Velocity (m/s)	Basic Physics Formula	FEM	Margin (%)
1	47,423	39,574	19,83%
2	94,846	86,998	9,02%
3	142,270	134,42	5,84%

Pada Tabel 5 dapat dilihat perbedaan besar penetrasi untuk kecepatan 1 m/s adalah sebesar 19,83%; untuk kecepatan 2 m/s sebesar 9,02%; dan untuk kecepatan 3 m/s sebesar 5,84%.

Nilai penetrasi yang dihasilkan menggunakan simulasi FEM cenderung lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan menggunakan formula fisika dasar. Hal ini dikarenakan perhitungan fisika dasar merupakan formula perhitungan perpindahan jarak tanpa hambatan, sedangkan simulasi tubrukan menggunakan FEM merupakan kondisi benda bergerak yang mengalami hambatan oleh benda lain.

V. KESIMPULAN

Haluan kapal *striking ship* menerima beban yang besar dalam waktu yang singkat. Semakin tinggi kecepatan maka semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai tegangan *ultimate*. Untuk kecepatan awal 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s tegangan mencapai *ultimate strength* masing-masing pada sekitar waktu 0,018 detik; 0,009 detik; dan 0,0056 detik. Pada waktu tersebut, haluan kapal sudah mengalami deformasi total dan tidak dapat kembali ke bentuk semula

Struktur konstruksi haluan kapal menyerap *Internal Energy* pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/ sebesar 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ. Semakin besar kecepatan awal maka semakin besar *internal energy* yang diserap. Karena *internal energy* merupakan nilai energi kinetik yang hilang saat tubrukan.

Haluan kapal juga menerima gaya dan menghasilkan deformasi penetrasi. Gaya maksimal yang dihasilkan pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan awal 1 m/s adalah 10,597 MN dengan penetrasi yang terjadi adalah 39,574 mm. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Kemudian untuk kecepatan awal 3 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Kondisi saat gaya yang terjadi cenderung konstan, sedangkan nilai penetrasi tetap naik merupakan suatu kondisi saat konstruksi kapal mempertahankan kedudukan deformasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Allianz Global Corporate & Specialty, "Safety and Shipping Review," 2017.
- [2] IOPCF, "International regime for compensation for oil pollution damage," 2006.
- [3] D. J. McGill and W. W. King, *Engineering Mechanics: An Introduction to Dynamics*. PWS Pub. Co., 1995.
- [4] C. Nave, "Elastic and inelastic collisions," *Hyperphysics*, 2010.
- [5] J. Y. Kim, "Analysis of Bow Crushing in Ship Collision," Massachusetts Institute of Technology., 2000.
- [6] P. K. K. Wisniewski, "The Effect of Selected Parameters on Ship Collision Results by Dynamic FE Simulations," *Finite Elem. Anal.*, pp. 985–1006, 2002.
- [7] S. Zhang, H. Ocakli, and P. Pedersen, "Crushing of Ship Bows In Head-On Collision," *Int. J. Marit. Eng.*, vol. 146, no. a2, 2004.
- [8] V. Minorsky, "An Analysis of Ship Collision with Reference to

- Protection of Nuclear Power Ships," *J. Sh. Res.*, 1959.
- [9] G. Woisin, *Design Against Collision*. Germany, 1979.
- [10] N. Jones and T. Wierzbicki, *Structural Crashworthiness*. Butterworth & Co. (Publisher) Ltd, 1983.
- [11] O. Kitamura, "Comparative Study on Collision Resistance of Side Structure," in *International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships*, 1996.
- [12] S. Haris and J. Amdahl, "Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting for Bow and Side Deformation Interaction," *Mar. Struct.*, vol. 31, 2013.
- [13] H. Hasanudin, W. D. Aryawan, A. Zubaydi, and T. Putranto, "Dynamics Finite Element for Ship Damage Collision Analysis," in *IPTEK Journal of Proceedings Series.*, 2017.
- [14] P. Pedersen, S. Valsgaard, D. Olsen, and S. Spangenberg, "Ship Impacts: Bow Collisions," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 163–187, 1993.