



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Tubrukan Lateral Pada Lambung Kapal Perintis Dengan Metode Elemen Hingga

Muhammad Rifqi Aditya¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki²⁾, Berlian Arswendo Aditya³⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Struktur dan Kekuatan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*)}e-mail : muhammadrifqiaditya@students.undip.ac.id

Abstrak

Tubrukan kapal merupakan salah satu insiden laut yang sering terjadi dan berdampak serius terhadap keselamatan struktur kapal, muatan, awak kapal, penumpang dan lingkungan. Kapal perintis, yang melayani rute ke daerah tertinggal dan terpencil, sangat penting keberadaannya dan perlu dianalisis ketahanannya terhadap insiden tabrakan guna menjamin keselamatan, keandalan operasional, dan pemenuhan standar keselamatan maritim. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tingkat kerusakan lambung saat tabrakan samping pada kapal perintis 1200 GT menggunakan metode elemen hingga berbasis perangkat lunak LS-DYNA. Pemodelan difokuskan pada bagian midship kapal sebagai objek tumbukan, menggunakan elemen shell dengan material plastic kinematic, sementara haluan kapal penabrak dimodelkan sebagai struktur rigid. Simulasi dilakukan untuk tiga variasi kecepatan yang berbeda, yaitu 8, 10, dan 12 knot selama 0,2 detik. Hasil menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan, semakin besar deformasi dan kerusakan yang terjadi dengan besar deformasi maksimum masing-masing 0,1264 m, 0,1664 m, dan 0,1973 m. Gaya kontak maksimum yang dihasilkan mencapai $1,48 \times 10^6$ N, $1,81 \times 10^6$ N, dan $1,99 \times 10^6$ N. Energi internal tumbukan yang diserap lambung kapal adalah sebesar 101,418 kJ; 160,001 kJ; dan 226,590 kJ. Nilai gaya kontak maksimum dan energi yang diserap oleh lambung kapal juga meningkat seiring bertambahnya kecepatan.

Kata Kunci : Kapal Perintis, Metode Elemen Hingga, Kekuatan, Tubrukan

1. PENDAHULUAN

Transportasi laut memegang peran penting di Indonesia, mengingat fungsinya sebagai penghubung utama antarpulau. Banyak masyarakat yang tinggal di pulau-pulau terluar dengan akses terbatas ke pusat perekonomian, sehingga harga komoditas di daerah terpencil cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah yang memiliki akses lebih baik. Untuk mengatasi masalah ini, Pemerintah menyediakan fasilitas berupa kapal perintis guna mendukung konektivitas dan distribusi barang ke wilayah-wilayah tersebut [1].

Kapal perintis adalah kapal khusus yang digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang, berfungsi sebagai penghubung antar pulau kecil di Indonesia, terutama di wilayah timur. Keberadaannya memiliki peran krusial dalam memperlancar mobilitas masyarakat serta distribusi barang di daerah-daerah terpencil [2].

Kapal perintis berperan dalam mendorong perkembangan wilayah tertinggal, terluar, terdepan, dan perbatasan (3TP) dengan meningkatkan aksesibilitas bagi masyarakat dalam menjalankan aktivitas ekonomi dan sosial. Oleh karena itu, pengembangan layanan transportasi dan infrastruktur jalan menjadi hal yang penting, salah satunya melalui operasional kapal perintis sebagai bagian dari program Tol Laut. Program ini menjadi prioritas Pemerintah, sehingga produksi kapal perintis dilakukan secara masif di berbagai galangan kapal di Indonesia. Perincian kapal perintis yang dibangun terdiri 25 unit kapal tipe 2000 GT, 20 unit kapal tipe 1200 GT, 5 unit kapal tipe 750 DWT, dan 3 unit kapal induk perambuan [3].

Dalam beberapa tahun terakhir, perdagangan lintas laut internasional terus mengalami peningkatan, menyebabkan lalu lintas maritim yang semakin padat dan berisiko tinggi terhadap

kecelakaan kapal. Menurut Undang - Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 Pasal 245 tentang pelayaran, kecelakaan kapal dapat berupa kapal tenggelam, kapal terbakar, kapal tubrukan, dan kapal kandas [4]. Tabrakan antarkapal menjadi salah satu insiden yang sering terjadi, mengancam keselamatan penumpang dan kru. Berdasarkan data dari Badan Keselamatan Maritim Eropa (EMSA), kapal kargo menjadi jenis kapal yang paling rentan mengalami kecelakaan (44,0%), diikuti oleh kapal penumpang (24,8%). Antara tahun 2014 hingga 2019, sekitar 43% kecelakaan di laut terkait dengan tabrakan, kandas, dan kontak [5]. Sedangkan di Indonesia, jenis kapal yang paling sering mengalami kecelakaan tubrukan kapal juga jenis kapal penumpang dan kapal barang [6]. Di Pelabuhan Banten, kecelakaan kapal jenis tubrukan merupakan kecelakaan yang sering terjadi dengan presentase sebesar 63,64% sebanyak tujuh kejadian [7]. Secara historis, insiden semacam ini telah menyebabkan banyak korban jiwa, kehilangan kargo, kerusakan lingkungan, serta kerugian finansial bagi pemilik kapal. Selain itu, tubrukan kapal pada *fixed structure* juga mengakibatkan kegagalan struktur seperti kerusakan permanen hingga keruntuhan struktur akibat tubrukan tersebut [8].

Ada beberapa kondisi skenario tubrukan pada kapal. Beragam skenario tabrakan didefinisikan seperti tabrakan kapal suplai dari arah haluan (*bow-on*), tabrakan kapal suplai dari sisi (*side-on*), tabrakan kapal suplai dari buritan (*stern-on*), dan tabrakan kapal pengangkut minyak (*offtake tanker*) dari Haluan [9].

Sudah banyak kasus terjadinya tabrakan pada kapal penumpang yang terjadi di Indonesia. Salah satu contoh kecelakaan nyata adalah tabrakan antara kapal *Ro-Ro* Marisa Nusantara dan kapal *Reefer* Qi Hang yang terjadi di Selat Sunda pada 3 Mei 2014. Dalam insiden tersebut, kapal *Ro-Ro* ditabrak oleh kapal *reefer* [10]. Diperkirakan, kapal penabrak melaju dengan kecepatan sekitar 12 knot atau setara dengan 6,17 m/s. Berdasarkan hasil survei di lokasi kejadian, kerusakan pada kapal yang ditabrak memiliki dimensi sepanjang 7 meter, lebar 5 meter, dan kedalaman 2 meter. Kecelakaan tabrakan kapal tersebut memiliki kronologi yaitu lambung samping kapal yang berhantaman dengan bagian haluan kapal lain.

Prisma Yosia Ginting [11] melakukan simulasi tubrukan Kapal *Bulk carrier* dengan Kapal *Tanker* dan LNG. Dari hasil simulasi tersebut, energi kinetik dan energi internal yang dihasilkan paling besar ketika bertubrukan antara dua kapal yang saling tegak lurus atau posisi 90°. Faktor kecepatan juga mempengaruhi seberapa besar deformasi dan energi yang dihasilkan.

Pemilihan material dan jenis struktur sangat penting untuk ketahanan kapal saat tubrukan terjadi. Selama tubrukan kapal, aspek struktural dan material sama-sama berkontribusi terhadap respon yang ditunjukkan dalam bentuk energi, gaya, dan deformasi [12]. Kerusakan akibat tabrakan dapat dikurangi melalui berbagai teknik, salah satunya yaitu perancangan struktur lambung yang tepat [13]. Struktur kapal dirancang untuk mampu menahan berbagai kondisi beban selama masa operasionalnya. Namun, dalam proses perancangannya, analisis terhadap beban kecelakaan, seperti tabrakan, belum secara umum dimasukkan, baik untuk kapal niaga maupun kapal angkatan laut. Beban-beban ini bersifat spontan, dan sejumlah kecelakaan serius dapat terjadi setelah peristiwa tabrakan [14]. Tubrukan yang terjadi pada kapal akan menyerap energi secara plastis yang dikompresikan menjadi rangkaian mekanisme deformasi, seperti plat lambung yang mengalami *bending*, peregangan plat, kepecahan gading besar, dan kepecahan pada geladak [15]. Dalam struktur kapal, *stiffened plates* dilengkapi dengan penegar vertikal atau horizontal untuk menahan beban konvensional seperti *shearing*, *bending*, dan *local buckling* [16]. *Stiffener* pada lambung samping memiliki kontribusi yang signifikan terhadap kemampuan kapal dalam menahan penetrasi dari haluan kapal penabrak [17].

Efek dari kapal yang mengalami tabrakan yaitu bagian yang tertabrak akan mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis merupakan perubahan bentuk yang permanen, meskipun bebannya dihilangkan [18]. Selama proses deformasi berlangsung, terjadi penyerapan energi oleh material yang dikenai gaya sebagai efek dari adanya gaya yang bekerja. Besar gaya yang bekerja akan memberikan efek pada perubahan bentuk dan dimensi suatu material [19]. Besar kecepatan kapal penabrak juga mempengaruhi deformasi plastis dari area yang tertabrak [20]. Energi dan tingkat kerusakan yang dihasilkan mewakili kekuatan struktur terhadap beban tumbukan [21]. Gaya dan energi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman penetrasi [22]. Semakin kecil kedalaman penetrasi kapal penabrak, semakin kecil energi yang diserap oleh struktur sisi lambung kapal yang ditabrak [23].

Dalam hal material kapal, kemampuan tahan terhadap tumbukan sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia material. Untuk struktur target yang sama, kandungan karbon yang lebih tinggi memberikan keuntungan saat beban aksidental terjadi. *Failure strain* dalam analisis memengaruhi besarnya energi yang dibutuhkan untuk merusak struktur yang terlibat. Pola deformasi yang terjadi

juga dipengaruhi oleh jenis *hardening* yang diterapkan [24]. Material baja karbon menengah hingga tinggi pada lambung samping dan area lainnya lebih tahan terhadap kerusakan berat akibat beban tumbukan.

Dalam kasus tubrukan, kapal-kapal yang terlibat diklasifikasikan sebagai *striking ship* atau kapal yang menabrak dan *struck ship* atau kapal yang ditabrak [25]. Ketika haluan kapal yang bertabrakan membenturkan sisi sejajar kapal yang tertabrak secara langsung, maka kedua kapal tersebut dapat disederhanakan menjadi balok ramping [26].

Metode Elemen Hingga adalah salah satu metode yang akurat untuk menganalisis respon struktur kapal akibat tubrukan [27]. Simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga non-linier dilakukan untuk menghasilkan data eksperimen virtual skenario tabrakan [28]. Pada penelitian yang sudah pernah dilakukan, metode untuk simulasi numerik dinamis tabrakan kapal menggunakan *software LS-DYNA* [29]. *LS-DYNA* memberikan hasil yang rinci untuk analisis tabrakan kapal, serta mendukung peningkatan kepercayaan terhadap model-model yang disederhanakan [30].

Berdasarkan studi kasus yang telah dijelaskan, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai tabrakan antara sisi lambung kapal dan ujung haluan kapal lain. Dalam penelitian ini, digunakan

kapal perintis berkapasitas 1200 GT yang diluncurkan oleh Kementerian Perhubungan Republik Indonesia pada tahun 2017. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan pada lambung kapal, besarnya gaya kontak maksimum, serta jumlah energi internal yang dihasilkan saat terjadi tabrakan.

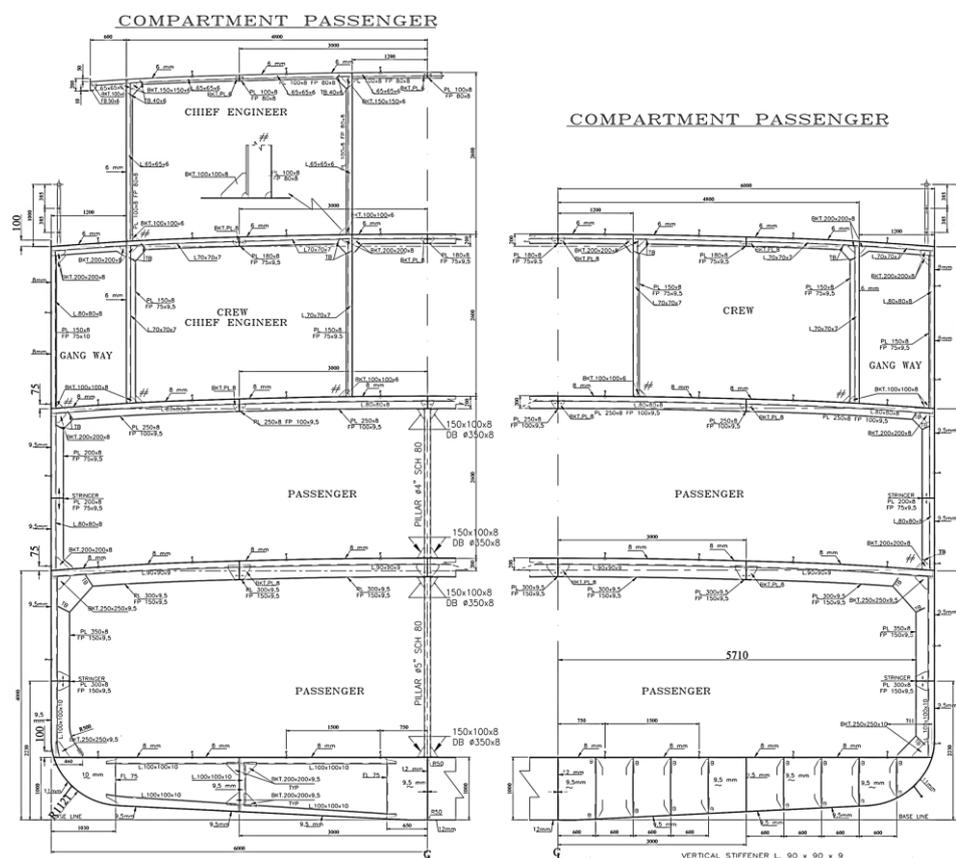
2. METODE

2.1. Data Kapal

Penelitian ini menggunakan data berupa ukuran utama Kapal Perintis 1200 GT milik Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, yang dikerjakan oleh PT Prakiti Hasta Dharma. Tabel 1 merupakan data ukuran utama data kapal perintis 1200 GT yang diperoleh.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal

No	Parameter	Nilai
1	LOA	62,8 m
2	LPP	57,5 m
3	LWL	58,78 m
4	B	12 m
5	H	6,6 m
6	T	2,7 m
6	Vs	12 Knot
7	Cb	0,663



Gambar 1. Midship Section Kapal Perintis

Tabel 2. Ukuran Profil

No.	Part	Dimensi (mm)
1	Web Frame	T 350 × 9,5 FP 150 × 9,5 T 250 × 8 FP 100 × 9,5 T 150 × 8 FP 75 × 9,5 T 100 × 8 FP 80 × 8
2	Deck Girder	T 300 × 9,5 FP 150 × 9,5 T 250 × 8 FP 100 × 9,5 T 180 × 8 FP 75 × 9,5 T 100 × 8 FP 80 × 8
3	Strong Beam	T 350 × 9,5 FP 150 × 9,5 T 250 × 8 FP 100 × 9,5 T 150 × 8 FP 75 × 9,5 T 100 × 8 FP 80 × 8
4	Side Stringer	T 300 × 8 FP 150 × 9,5 T 200 × 8 FP 75 × 9,5
5	Main Frame	L 100 × 100 × 10 L 80 × 80 × 8 L 65 × 65 × 6
6	Deck Beam	L 90 × 90 × 9 L 80 × 80 × 8 L 70 × 70 × 7 L 65 × 65 × 6
8	Pillar	Ø4 inch, Ø5 inch

Tabel 3. Ketebalan Plat

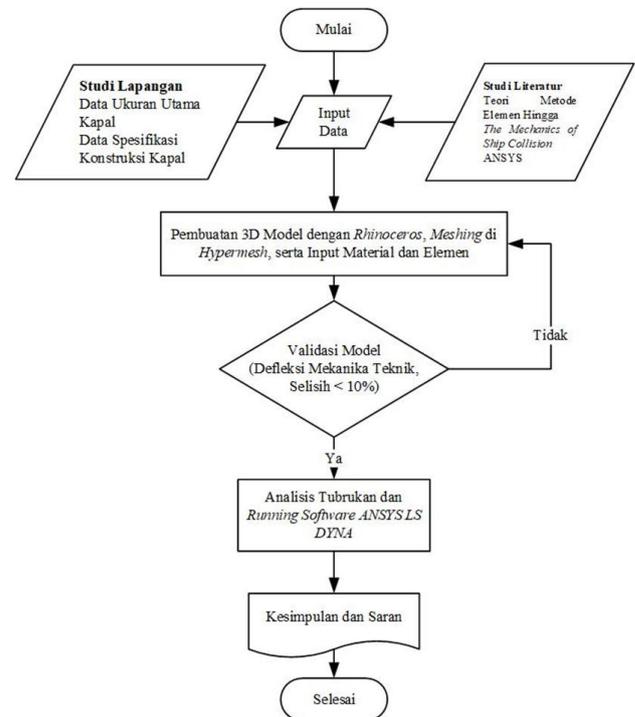
No	Part	Tebal (mm)
1	Keel plate	12
2	Bottom shell	9,5
3	Side shell	9,5 (bawah), 8 (atas)
4	Double bottom plate	8
5	Main deck plate	8
6	Transverse bulkhead	8
7	Bilge plate	11

Gambar kerja *midship section* dari kapal perintis yang akan dimodelkan digambarkan pada Gambar 1. Konstruksi pada kapal ini yaitu konstruksi melintang. Pada Tabel 2 dan Tabel 3 menjelaskan ukuran profil dan tebal plat pada bagian *midship* kapal perintis dari *double bottom* sampai *deck* paling atas kapal. Konstruksi pada kapal terdiri dari berbagai profil baja yang memiliki peran penting dalam mendukung kekuatan dan kekakuan keseluruhan lambung kapal. Plat-plat yang digunakan dalam konstruksi lambung juga memiliki ketebalan yang bervariasi tergantung pada lokasinya di struktur kapal. Ketebalan plat ini sangat berpengaruh terhadap kekuatan lokal maupun global kapal.

2.2. Flow Chart

Untuk memberikan gambaran umum mengenai tahapan penelitian, disusunlah bagan alir (*flowchart*) seperti pada Gambar 2 yang memperlihatkan alur proses dari awal hingga akhir. *Flow chart* ini mencakup proses pengumpulan data melalui studi lapangan dan studi literatur, pengolahan data, pembuatan model 3D menggunakan perangkat lunak *Rhinoceros*, hingga

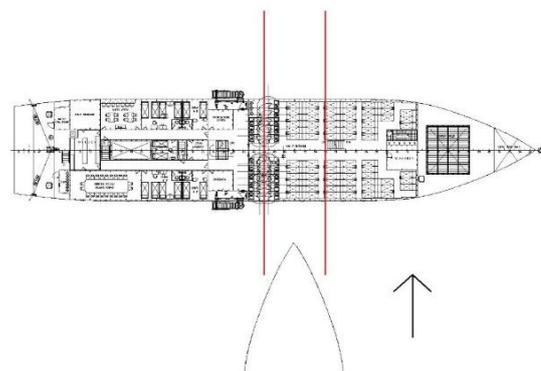
analisis tubrukan menggunakan *software ANSYS LS-DYNA*. Tahapan akhir meliputi proses validasi hasil simulasi sebelum penarikan kesimpulan dan pemberian saran.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.3. Skenario Tubrukan

Skema tubrukan yang terjadi yaitu kapal akan bergeser dengan kecepatan tertentu dan bagian *midship section* kapal tersebut akan berbenturan dengan haluan kapal lain seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skenario Tubrukan

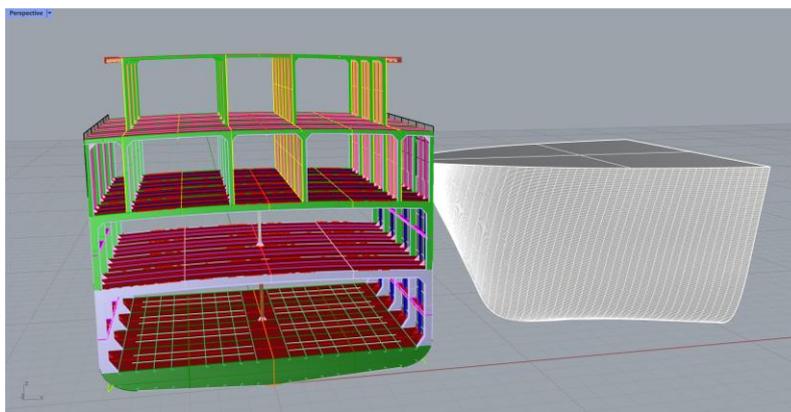
Dalam pemberian kecepatan atau *velocity* dimasukkan data berupa kecepatan translasi yang searah sumbu X. *Initial velocity* atau kecepatan awal ditentukan sebesar 8 knot, 10 knot, dan 12 knot pada badan kapal. *End time* ditentukan sebesar 0,2 detik.

2.4. Pemodelan Geometri dan Meshing

Pembuatan model menggunakan *software modelling Rhinoceros* dan analisis struktur sistem konstruksi lambung menggunakan aplikasi elemen hingga yaitu *software Ansys LS-DYNA*. Model yang dibuat adalah model bagian kapal pada *frame 44* sampai *56*.

Model kapal yang telah dibuat lalu di-*meshing* terlebih dahulu di *software Altair Hypermesh*. Setelah di-*meshing*, lalu di-*convert* ke *LS-DYNA*. Proses pembuatan model elemen hingga atau *meshing* merupakan tahap pembentukan jaringan elemen yang terhubung melalui titik-titik *node*. Setiap elemen harus saling terhubung pada *node*

yang sama, karena jika terdapat elemen atau kelompok elemen yang tidak saling terhubung, maka analisis tidak dapat dijalankan. Pembentukan elemen pada geometri dilakukan melalui pengaturan ukuran *mesh* dan pemilihan jenis elemen [31]. Ukuran *meshing* pada *midship* kapal yaitu sebesar 5 cm, sedangkan pada haluan kapal sebesar 15 cm. Kekasaran *mesh* (*mesh fineness*) merupakan faktor penting dalam pemodelan struktur dengan metode elemen hingga. Jumlah elemen yang besar dibutuhkan untuk keakuratan, terutama pada komponen yang mengalami kontak langsung [32]. Tipe elemen yang digunakan yaitu tipe *mixed mesh* (*trias and quad elements*) [33].



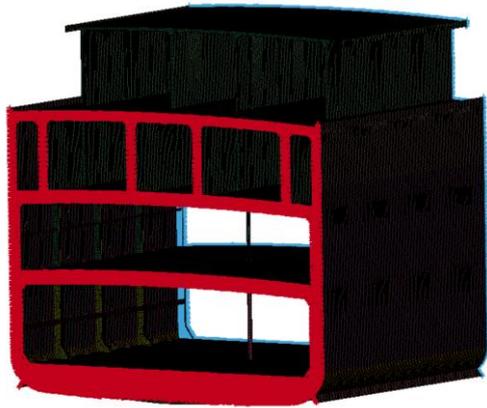
Gambar 4. Pemodelan di *Software Rhinoceros*



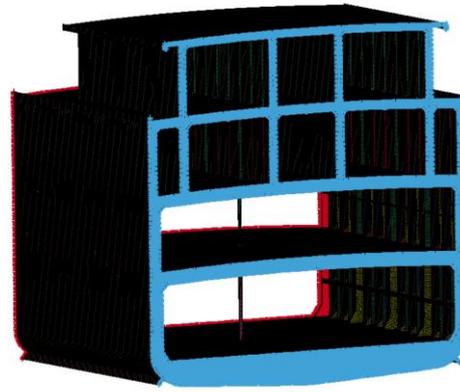
Gambar 5. Model Setelah Di-*convert* ke *Software ANSYS LS-DYNA* Serta Telah Di-*meshing* Pada *Software Altair Hypermesh*

Gambar 4 merupakan model saat dibuat pada *software rhinoceros*. Pada Model tersebut, pembagian *layer* berdasarkan jenis profil atau plat dengan ketebalannya. Hal ini dilakukan untuk mempermudah saat melakukan pendefinisian ukuran ketebalan di *LS-DYNA*.

Model yang telah dilakukan proses *meshing* ditampilkan pada Gambar 5. Model yang



telah di-*meshing* lalu diberikan kondisi batas (*boundary condition*) untuk membatasi gerakan pada bagian tertentu dari struktur guna menciptakan kondisi batas yang merepresentasikan lingkungan sebenarnya atau untuk menyederhanakan domain analisis. Berdasarkan Gambar 6, *boundary condition* diterapkan pada dua sisi model struktur *midship*.



Gambar 6. *Boundary Condition* Pada Model *Midship*

2.5. Pendefinisian Pada Model

Berdasarkan Tabel 4, *midship* kapal akan menggunakan elemen *shell* dengan ketebalan yang bervariasi tergantung profil dan plat, sedangkan untuk haluan kapal yang menabrak akan menggunakan elemen *shell* dengan ketebalan 12 mm.

Tabel 4. Pendefinisian Elemen

Geometri	Elemen	Real Constant	
		Tipe	Nilai
<i>Midship</i>	<i>SHELL</i>	Ketebalan <i>surface</i>	Variasi
Haluan Kapal Lain	<i>SHELL</i>	Kelebalan <i>Surface</i>	12 mm

Material yang akan digunakan untuk *midship* kapal yaitu jenis *plastic kinematic* [34]. Material ini dipilih karena tabrakan antar struktur baja melibatkan deformasi plastis. Haluan kapal penabrak dimodelkan menggunakan material kaku (*rigid*), sehingga seluruh energi tubrukan diserap sepenuhnya oleh badan kapal yang ditabrak. Pendekatan ini bertujuan untuk memusatkan analisis pada struktur kapal perintis, karena distribusi tegangan hanya terjadi pada kapal tersebut. Material *plastic kinematic* pada penelitian ini merepresentasikan baja karbon menengah yaitu baja EH36 dengan parameter seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Material *Plastic Kinematic*

Parameter	Nilai
<i>Mass Density</i>	$7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<i>Modulus Young</i>	$2,10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
<i>Poisson Ratio</i>	0,3
<i>Yield Stress</i>	$4,40 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
<i>Tangent Modulus</i>	$1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
<i>Hardening Parm</i>	0
<i>Strain Rate (SRC)</i>	3200
<i>Strain Rate (SRP)</i>	5
<i>Failure Strain</i>	0,2

Tabel 6. Parameter Material *Rigid*

Parameter	Nilai
<i>Mass Density</i>	2593,42006 kg/m^3
<i>Modulus Young</i>	$2,10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
<i>Poisson ratio</i>	0,3

Angka *density* pada haluan *rigid* pada Tabel 6 dihasilkan dari hasil pembagian antara massa kapal penabrak yaitu 1286,632 ton dengan volume haluan kapal sebesar 496,873 m^3 . Hal ini dilakukan agar haluan kapal penabrak dapat mewakili seluruh massa kapal.

Kontak yang digunakan pada simulasi tubrukan kali ini menggunakan *AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE* dengan nilai koefisien gesek statis sebesar 0,74 dan koefisien gesek dinamis sebesar 0,57. *Initial velocity* yang

digunakan pada tubrukan kapal yaitu sebesar 8 knot (4,11556 m/s), 10 knot (5,14444 m/s), dan 12 knot (6,17333 m/s). Waktu yang ditentukan untuk simulasi yaitu selama 0,2 detik untuk semua variasi kecepatan dengan *output control* sebanyak 10 *step*. Hasil simulasi direkam dengan format *d3plot*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Validasi Model

Dalam penelitian ini, validasi model *midship* akan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik menggunakan *LS-DYNA* dengan perhitungan analitik berdasarkan teori mekanika teknik. Metode validasi yang digunakan adalah model balok kantilever, di mana *midship* dianggap sebagai elemen struktur dengan kondisi tumpuan jepit pada satu sisi dan beban bekerja pada sisi bebas. Perhitungan defleksi analitik akan dilakukan menggunakan persamaan defleksi maksimum untuk balok kantilever dengan beban terpusat di ujung:

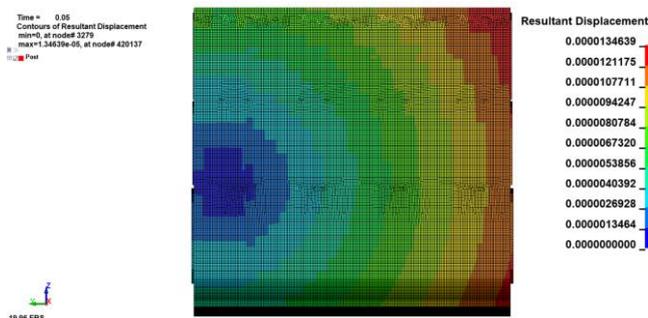
$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

Dengan *F* yaitu *Force* (N) sebesar 60000 N, *L* adalah panjang model (mm) sebesar 9,6 m, *E* adalah Modulus Elastisitas sebesar $2,1 \times 10^6$ Pa, dan *I* adalah Inersia sebesar $6,5498 \text{ mm}^4$. Hasil perhitungan sebagai berikut.

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

$$\delta = \frac{60000 \times 9,6^3}{3 \times 2,1 \times 10^{11} \times 6,5498}$$

$$\delta = 1,30438 \times 10^5 \text{ m}$$



Gambar 7. Perhitungan Numerik

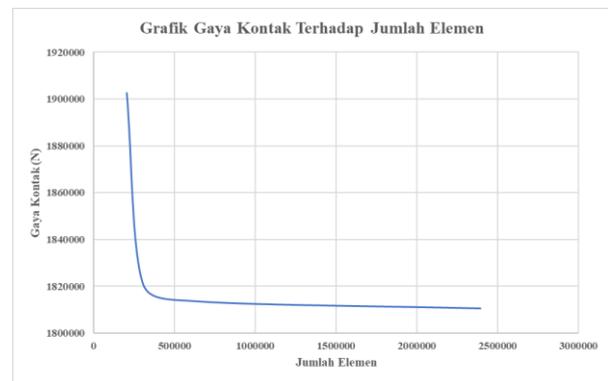
Pada Gambar 7 merupakan hasil dari perhitungan numerik menggunakan *FEM software* didapatkan nilai defleksi sebesar $1,34639 \times 10^6$ m.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Pada Perhitungan Dan Numerik *Software*

δ Pada Perhitungan (m)	δ Pada <i>Software</i> (m)	Selisih (%)
$1,30436 \times 10^5$	$1,34639 \times 10^5$	3,17

Berdasarkan hasil pada Tabel 7, besar antara defleksi pada perhitungan rumus dengan hasil *software* hampir mendekati sama, yaitu dengan selisih 3,17 %.

Penentuan ukuran *mesh* untuk validasi model juga dilakukan lewat konvergensi *mesh*. Tujuan utamanya yaitu untuk menentukan ukuran *mesh* yang paling sesuai dengan model. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis FEM bersifat akurat dan dapat diandalkan. Proses uji dilakukan dengan mengecilkan ukuran *mesh* secara bertahap dari ukuran awal hingga ditemukan ukuran yang optimal.



Gambar 8. Grid Independence

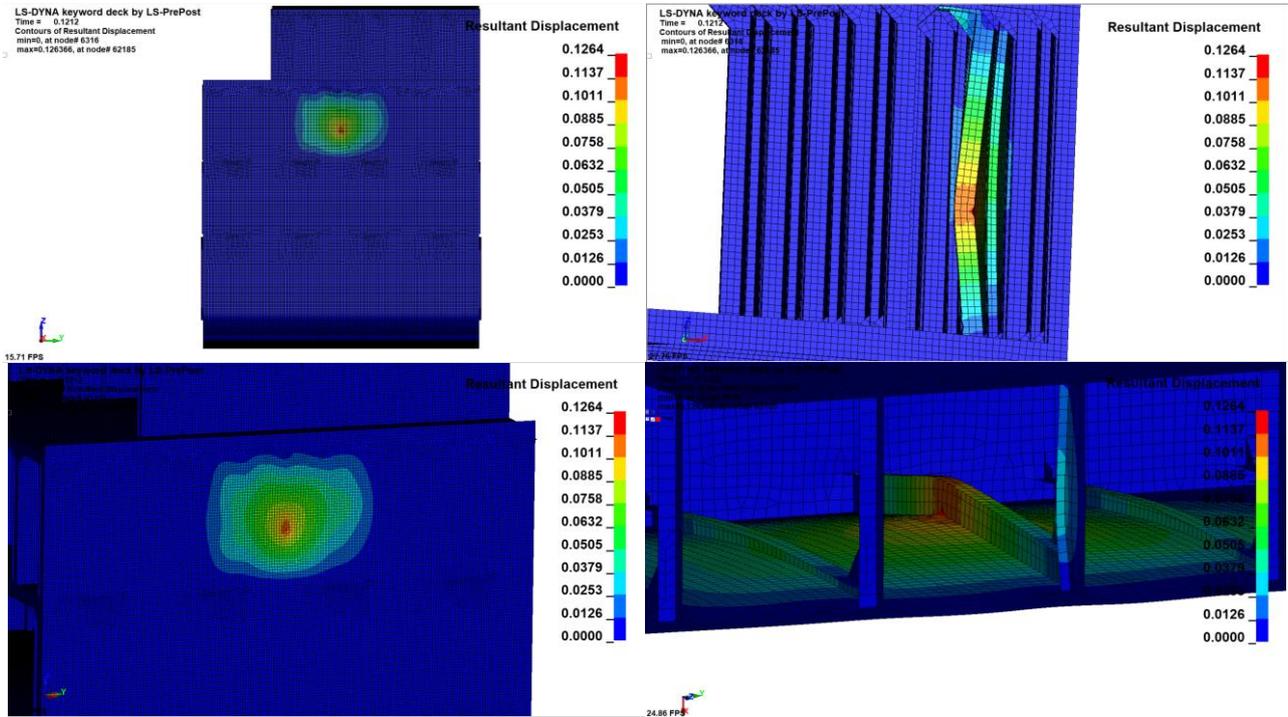
Berdasarkan hasil uji konvergensi *mesh* seperti pada Gambar 8, didapatkan hasil *error* yang rendah, yaitu 0,5014 %. Oleh karena itu digunakanlah ukuran *meshing* 5 cm pada model *midship* dengan elemen berjumlah 629762. Ukuran ini dipilih dikarenakan memiliki keakuratan yang memiliki *error* yang sedikit *mesh* ini memiliki hasil simulasi yang cukup akurat dibandingkan dengan ukuran *mesh* lainnya serta waktu simulasi yang standar.

3.2. Deformasi *Midship* dan *Displacement*

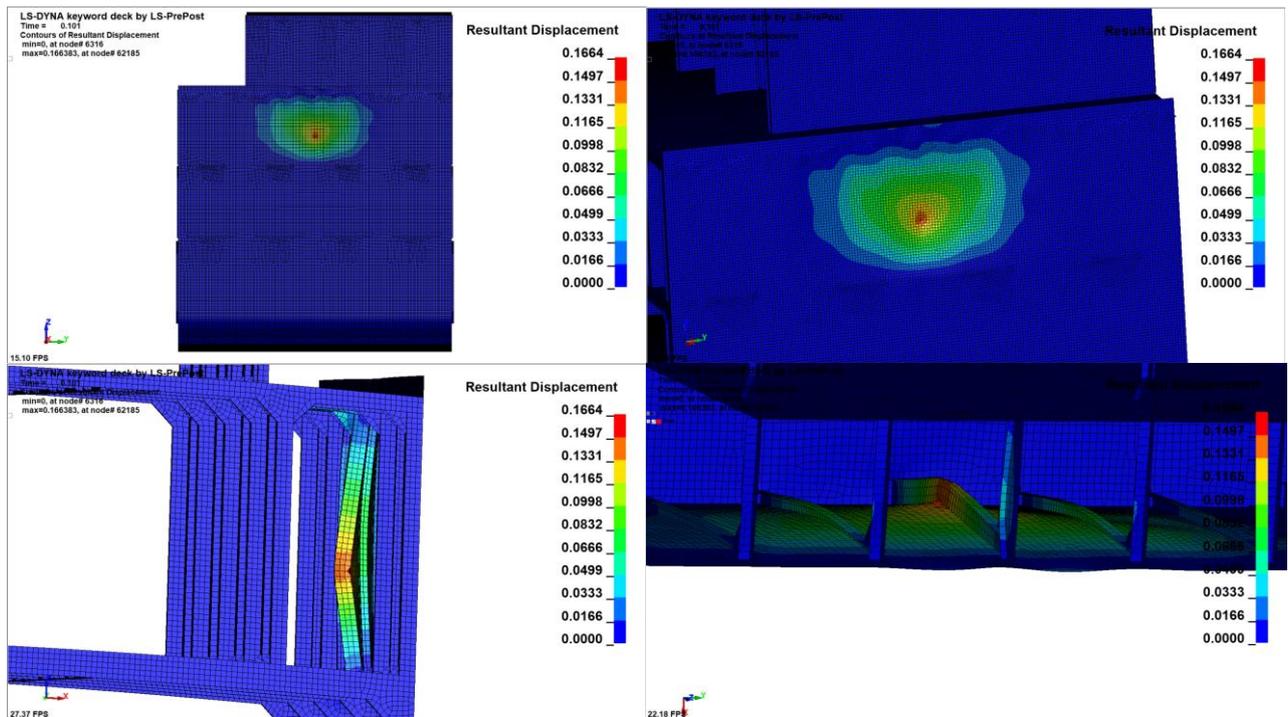
Deformasi atau perpindahan (*displacement*) pada struktur *midship* merupakan indikator langsung dari dampak kerusakan akibat tabrakan kapal dan menggambarkan deformasi geometris dari struktur akibat gaya tumbukan. Ketika haluan kapal penabrak menghantam *midship*, struktur menerima gaya tekan yang menyebabkan terjadinya pergeseran bentuk. Untuk mengetahui struktur mengalami pergeseran akibat tumbukan, dilakukan analisis visual terhadap distribusi *displacement* pada *midship*. Ada dua visual yang

menggambarkan deformasi tersebut, yaitu *resultant displacement* dan *effective plastic strain*. Gambar 9 dan gambar 11 menampilkan kontur perpindahan total (*resultant displacement*) dan regangan plastis yang terjadi pada elemen-elemen di sekitar area tumbukan. Visualisasi ini disajikan

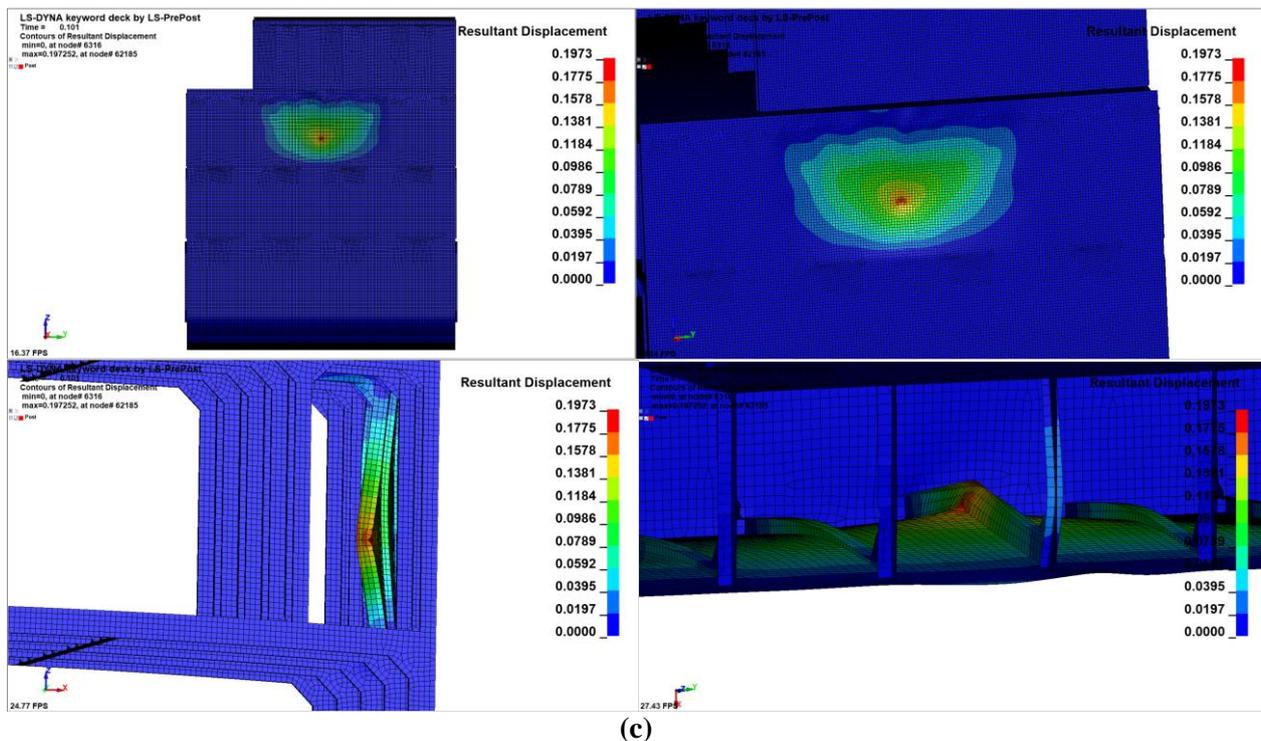
dalam tampilan berbagai sudut pandang untuk menunjukkan distribusi deformasi secara menyeluruh, baik pada sisi luar permukaan, bidang potong melintang, maupun bagian dalam struktur.



(a)



(b)



Gambar 9. Deformasi pada Lambung Kapal Pada Kecepatan (a) 8 Knot, (b) 10 Knot, dan (c) 12 knot

Pada gambar 9, terlihat *midship* mengalami deformasi setelah ditubruk dengan haluan. Plat samping lambung mengalami bengkok, namun tidak robek setelah ditubrukkan oleh haluan kapal dengan tiga kecepatan yang berbeda. Area elemen yang memerah pada samping lambung merupakan daerah tubrukan yang mendapatkan tekanan paling masif. Peningkatan kecepatan berdampak langsung terhadap intensitas serta penyebaran deformasi.

Tabrakan pada kecepatan 8 knot menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,12636 meter. Area yang mengalami deformasi paling signifikan berada pada bagian pelat sisi yang langsung menerima benturan. Warna merah hanya muncul pada satu titik sempit, menandakan bahwa dampak benturan masih dalam kategori ringan. Struktur di sekitar area benturan sebagian besar masih berada dalam rentang deformasi rendah hingga sedang (warna biru hingga hijau).

Nilai deformasi maksimum tercatat sebesar 0,16633 meter saat ditabrak pada kecepatan 10 knot. Area berwarna merah yang menunjukkan deformasi tinggi menjadi lebih luas dibandingkan simulasi sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa energi tumbukan yang lebih besar mulai menyebabkan distribusi deformasi meluas ke komponen struktur di sekitarnya, termasuk *stiffener*.

Hasil simulasi pada kecepatan 12 knot menunjukkan deformasi maksimum mencapai 0,19752 meter. Warna merah terlihat lebih dominan dan tersebar luas pada area pelat sisi, menunjukkan bahwa beban tumbukan telah

menghasilkan deformasi plastis yang sangat signifikan. Beberapa elemen mengalami pergeseran yang besar, menandakan bahwa struktur mendekati atau bahkan telah melewati batas elastis materialnya. Kondisi ini mengarah pada kemungkinan terjadinya kerusakan permanen seperti *buckling* atau robeknya pelat akibat tekanan lokal yang tinggi.

Tabel 8 menyajikan perbandingan nilai *resultant displacement* (perpindahan total) pada struktur kapal ketika mengalami tabrakan dengan kecepatan yang berbeda, yaitu 8 knot, 10 knot, dan 12 knot dalam rentang waktu 0 hingga 0,20 detik.

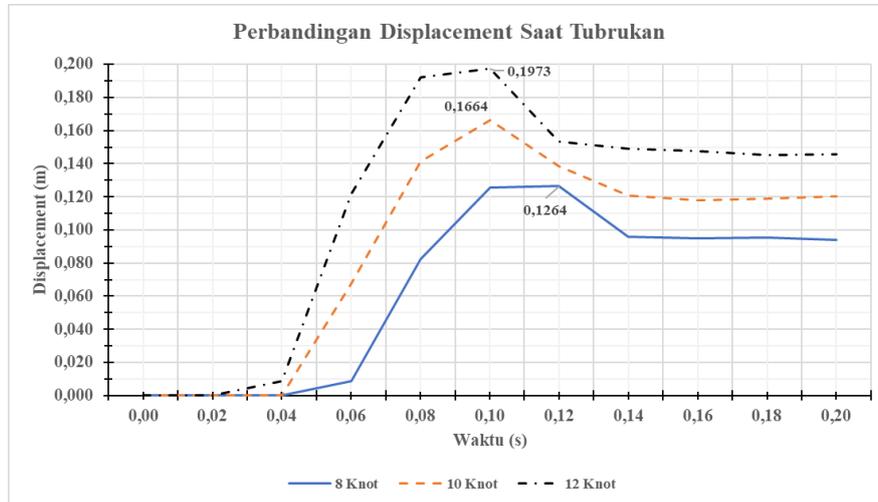
Tabel 8. Displacement Tubrukan

Waktu (s)	<i>Resultant Displacement</i> (m)		
	8 Knot	10 Knot	12 Knot
0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,02	0,0000	0,0000	0,0000
0,04	0,0000	0,0000	0,0089
0,06	0,0089	0,0676	0,1218
0,08	0,0824	0,1416	0,1921
0,10	0,1256	0,1664	0,1973
0,12	0,1264	0,1387	0,1535
0,14	0,0959	0,1208	0,1490
0,16	0,0951	0,1181	0,1476
0,18	0,0952	0,1189	0,1451
0,20	0,0938	0,1202	0,1458

Pada kecepatan 8 knot, deformasi maksimum tercapai saat waktu 0,12 detik, yaitu sebesar 0,1264 m. Pada kecepatan 10 knot dan 12 knot, deformasi

maksimum tercapai saat waktu 0,1 detik dengan masing-masing sebesar 0,1664 m dan 0,1973 m. Kecepatan 12 knot memiliki lonjakan nilai *displacement* yang paling tinggi dalam interval waktu 0,06 - 0,10 detik, dengan selisih antar waktu yang relatif besar dibandingkan kecepatan lainnya. Hal ini terlihat dari kenaikan *displacement* dari

0,1218 m pada 0,06 detik menjadi 0,1973 m pada 0,10 detik. Sedangkan pada kecepatan 8 knot, kenaikan *displacement* terjadi secara lebih lambat, dengan selisih nilai yang lebih kecil antar waktu.



Gambar 10. Perbandingan *Displacement* Tubrukan Kapal

Gambar 10 menunjukkan grafik besar *displacement* pada daerah *node* yang terkena tubrukan kapal. Bentuk kurva *displacement* pada grafik memperlihatkan kecenderungan awal yang meningkat tajam hingga mencapai nilai maksimum dalam waktu yang relatif singkat. Kenaikan ini mencerminkan fase awal tumbukan di mana gaya dampak mulai bekerja dan menyebabkan deformasi signifikan pada struktur lambung. Setelah mencapai puncaknya, grafik *displacement* menurun secara bertahap, menunjukkan bahwa setelah nilai maksimum tercapai, terjadi pelepasan energi dan struktur mulai mengalami peluruhan deformasi. Selanjutnya, perubahan nilai *displacement* yang kecil menunjukkan bahwa deformasi tidak lagi berkembang secara signifikan setelah waktu tersebut. Hal ini karena plat diperkuat oleh adanya *web frame* yang menegarkan strukturnya [35]. Selain itu, saat tubrukan, ujung haluan kapal penabrak tepat menabrak bagian *web frame*.

Dari hasil tersebut, menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan kapal saat menubruk, maka penetrasinya ke lambung *midship* semakin dalam. Seluruh kecepatan menunjukkan kecenderungan nilai yang relatif stabil atau menurun pada akhir simulasi. Ini mengindikasikan bahwa struktur telah berhenti mengalami deformasi tambahan, atau telah mencapai kondisi stabil pasca tumbukan.

Untuk menentukan apakah plat pada lambung kapal perintis wajib diganti setelah mengalami

tumbukan, dilakukan analisis berdasarkan standar klasifikasi yang berlaku. Menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), plat harus diganti apabila mengalami deformasi plastis permanen yang melebihi 5 kali ketebalan plat [36].

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga, deformasi maksimum dari plat samping (*side shell*) pada *midship section* diperoleh pada berbagai kecepatan tumbukan. Ketebalan plat samping bagian atas yang digunakan dalam model adalah 8 mm. Oleh karena itu, ambang batas deformasi maksimum yang diperbolehkan menurut BKI adalah $5 \times 8 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$ atau 0,04 m.

Tabel 9. Evaluasi Penggantian Plat Berdasarkan Deformasi Maksimum dan Aturan BKI

Kecepatan Tabrakan	Deformasi (m)	Tebal Plat (m)	Batas BKI (m)	Status Plat
8 knot	0,1264	0,008	0,04	Wajib diganti
10 knot	0,1664	0,008	0,04	Wajib diganti
12 knot	0,1973	0,008	0,04	Wajib diganti

Berdasarkan hasil simulasi dan aturan resmi BKI, seluruh deformasi maksimum pada pelat akibat tumbukan melampaui ambang batas yang diizinkan. Oleh karena itu, plat pada lambung kapal dinyatakan wajib diganti, untuk memastikan

integritas struktural kapal sesuai dengan ketentuan klasifikasi.

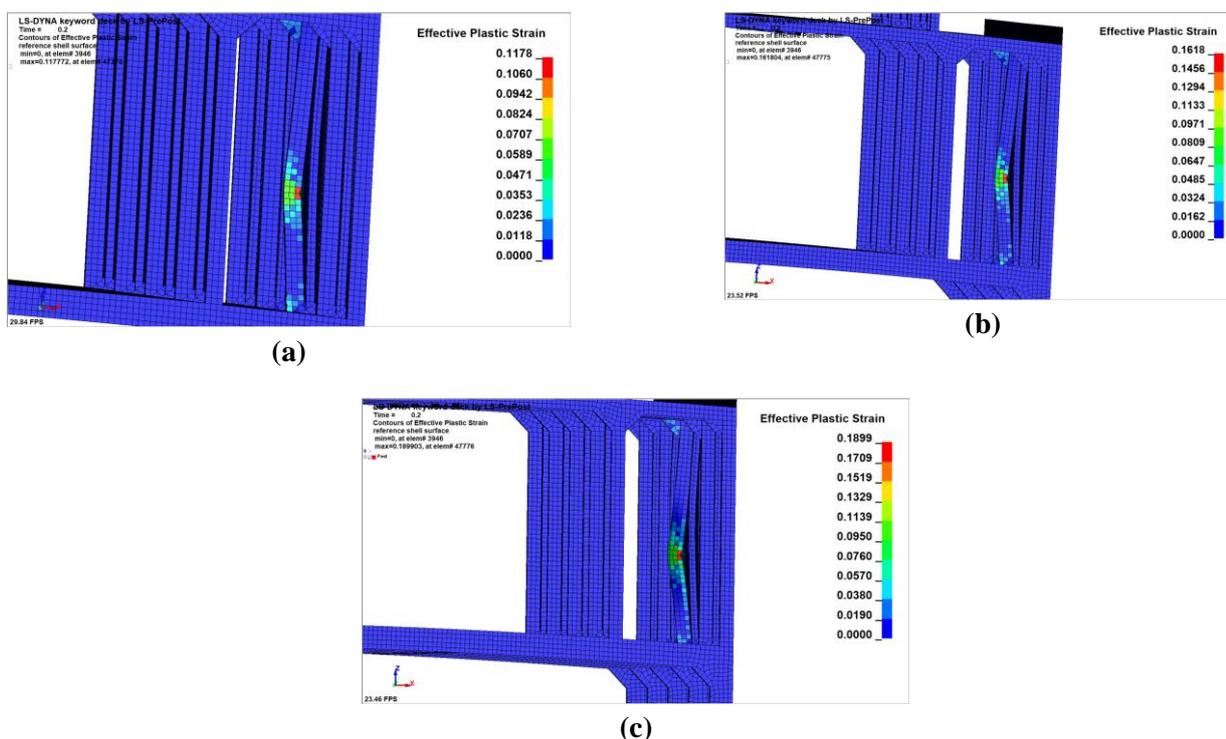
Selain aturan diatas, terdapat aturan BKI *Rules for Hull Construction* tentang deformasi lokal plat antara *stiffener* tidak boleh melebihi 2% dari jarak antar *stiffener*. Batas ini ditetapkan untuk mencegah terjadinya *buckling* lokal, hilangnya kedap air (*watertight integrity*), dan kerusakan struktural permanen pada panel lambung. Analisis terhadap pelampauan batas tetap diperlukan untuk menilai risiko kerusakan dan menentukan kebutuhan perbaikan atau peningkatan kekuatan struktur.

Pada kapal perintis yang dianalisis, jarak antar *stiffener* pada panel *midship* adalah 0,8 m, sehingga batas deformasi lokal yang diizinkan adalah $\delta_{izin} = 2\% \times 0,8 \text{ m} = 0,016 \text{ m}$.

Tabel 10. Perbandingan Deformasi Maksimum dengan Batas Izin Aturan BKI

Kecepatan Tabrakan	Deformasi (m)	Batas Izin BKI (m)	Faktor Pelampauan
8 knot	0,1264	0,016	7,90 ×
10 knot	0,1664	0,016	10,40 ×
12 knot	0,1973	0,016	12,33 ×

Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum plat lambung pada jarak antar *frame* 0,8 m secara signifikan melebihi batas izin yang ditetapkan oleh BKI, yaitu 0,016 m atau 2% dari panjang panel antara *stiffener*. Dalam kasus deformasi sebesar ini, penggantian penuh lebih direkomendasikan demi memastikan keselamatan operasional kapal.



Gambar 11. *Effective Plastic Strain* Saat Tubrukan Berkecepatan (a) 8 Knot, (b) 10 Knot, dan (c) 12 Knot

Gambar 11 menunjukkan bagian *midship* yang mengalami regangan plastis, yaitu bagian dari regangan total yang tidak bisa kembali lagi (*irreversible*) setelah beban dilepas sehingga mengalami deformasi permanen.

Pada kecepatan 8 knot, nilai maksimum regangan plastis tercatat sebesar 0,1178, yang menunjukkan bahwa deformasi plastis mulai terbentuk pada beberapa elemen di area sekitar *web frame*. Ketika kecepatan ditingkatkan menjadi 10 knot, nilai regangan plastis maksimum meningkat menjadi 0,1618. Area dengan deformasi plastis menjadi lebih luas dan regangan yang sebelumnya terkonsentrasi kini mulai menyebar ke elemen-elemen di sekitarnya. Saat tubrukan pada

kecepatan tertinggi yaitu 12 knot, regangan plastis maksimum mencapai 0,1890. Area deformasi plastis mengalami penyebaran yang paling luas dibanding dua kondisi sebelumnya. Material di area tubrukan telah mengalami deformasi plastis yang sangat besar, bahkan mendekati batas kegagalan material.

Dalam simulasi ini, nilai *failure strain* yang diizinkan sebelum elemen dianggap gagal telah ditetapkan sebesar 0,2. Parameter ini berperan penting dalam menentukan apakah suatu elemen material akan tetap aktif atau dihapus (*element deletion*) selama proses tumbukan berlangsung. *Failure strain* merupakan salah satu batas kritis dalam pemodelan kerusakan material, di mana jika

regangan plastis efektif suatu elemen melebihi nilai tersebut, maka elemen tersebut tidak lagi mampu menahan beban dan dianggap mengalami kegagalan permanen. Berdasarkan hasil simulasi, seluruh nilai *effective plastic strain* berada di bawah batas kegagalan 0,2, yang berarti belum ada elemen yang dihapus dari model, meskipun beberapa area telah mengalami deformasi plastis yang cukup signifikan. Apabila EPC maksimum melebihi nilai ini, maka dapat diasumsikan telah terjadi kerusakan kritis yang berpotensi menyebabkan kebocoran.

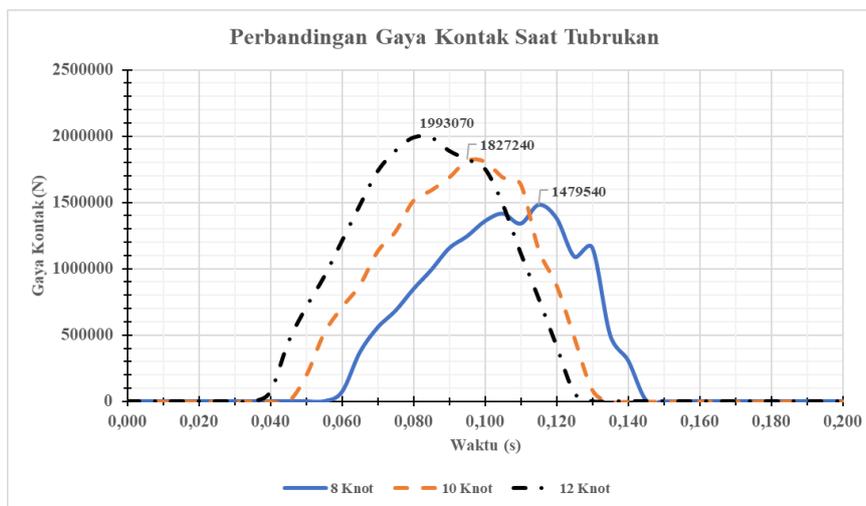
Tabel 11. Nilai EPC Maksimum Terhadap *Failure Strain* dan Status Kebocoran

Kecepatan (knot)	<i>Effective Plastic strain</i> maksimum	<i>Failure Strain</i>	Status Kebocoran Plat
8	0,1178	0,20	Belum bocor
10	0,1618	0,20	Belum bocor
12	0,1890	0,20	Belum bocor

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh nilai EPC maksimum masih berada di bawah ambang *failure strain* 0,20. Hal ini mengindikasikan bahwa, pada skenario tabrakan dengan kecepatan 8 - 12 knot, deformasi yang terjadi belum cukup untuk menyebabkan kebocoran pada lambung kapal. Meskipun demikian, pada kecepatan 12 knot nilai EPC (0,1890) sangat mendekati ambang batas, sehingga pada kondisi nyata dengan faktor tambahan seperti korosi, sambungan las yang lemah, atau beban dinamis dari gelombang, potensi terjadinya retak dan kebocoran akan meningkat secara signifikan.

3.3. Gaya Kontak

Gaya kontak merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis dampak dari tabrakan antar kapal. Besarnya gaya ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal penabrak, massa, serta karakteristik struktur yang terlibat dalam tumbukan. Nilai gaya kontak terekam pada *file RCFORC* yang sebelum simulasi telah di-*setting* pada *keyword DATABASE_ASCII_option*.



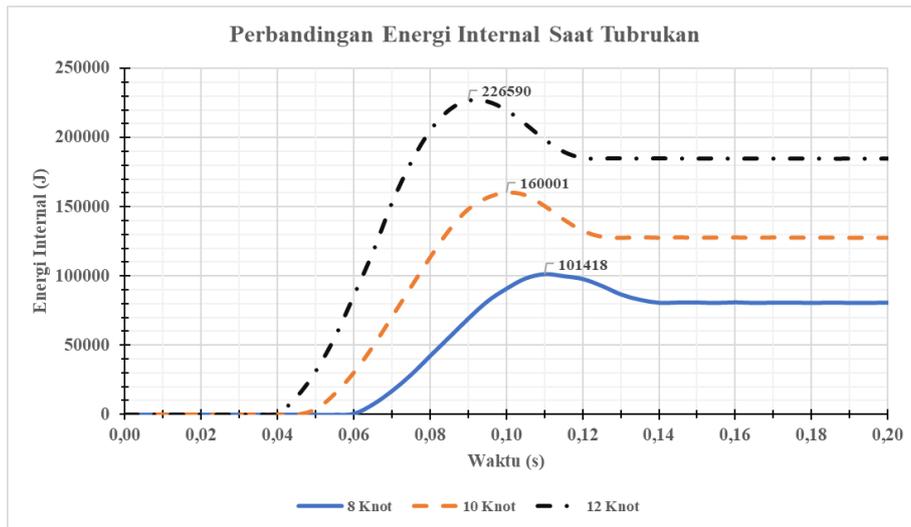
Gambar 12. Perbandingan Gaya Kontak Saat Terjadinya Tubrukan Kapal

Grafik yang ditampilkan pada Gambar 12 menunjukkan besaran gaya yang dihasilkan per waktu saat terjadinya momen tubrukan kapal. Grafik yang naik drastis saat waktu tertentu menunjukkan tubrukan terjadi pada waktu tersebut. Momen tubrukan saat kecepatan haluan sebesar 8 knot, 10 knot, dan 12 knot menghasilkan gaya kontak maksimum masing-masing sebesar $1,48 \times 10^6$ N, $1,81 \times 10^6$ N, dan $1,99 \times 10^6$ N. Dari hasil tersebut, semakin tinggi angka kecepatan kapal saat menabrak *midship*, maka gaya kontak maksimum akan semakin besar juga. Grafik yang menurun setelah tubrukan disebabkan *rigid* haluan

kapal yang mundur setelah bertumbukkan dengan *midship*.

3.4. Energi Internal

Energi internal mencerminkan besarnya energi yang diserap oleh struktur kapal akibat deformasi selama proses tumbukan. Nilai ini sangat penting untuk mengetahui sejauh mana struktur mengalami kerusakan. Nilai energi internal terekam pada *file GLSTAT* yang sebelum simulasi telah di-*setting* pada *keyword DATABASE_ASCII_option*.



Gambar 13. Perbandingan Energi Internal Saat Terjadinya Tubrukan Kapal

Gambar 13 menunjukkan grafik energi internal yang dihasilkan saat proses tubrukan kapal. Pada hasil tersebut, terlihat grafik mengalami kenaikan energi saat proses tubrukan berlangsung. Besaran energi tersebut merupakan energi yang diterima *midship* dari haluan saat terjadinya tubrukan. Besar energi maksimum yang diterima *midship* kapal saat ditabrak haluan pada kecepatan 8 knot, 10 knot, dan 12 knot masing-masing sebesar 101418 J, 160001 J, dan 226590 J. Angka kecepatan yang semakin tinggi membuat besar energi internal yang dihasilkan semakin besar.

Grafik yang agak menurun setelah tubrukan disebabkan *rigid* haluan kapal yang mundur setelah bertumbukkan dengan *midship*. Meski sempat menurun, grafik energi internal setelah tubrukan cenderung stagnan atau tidak sampai turun drastis ke 0 J. Jika energi internal tidak turun kembali ke nol setelah tubrukan berhenti, artinya struktur *midship* mengalami deformasi permanen (*plastic deformation*) dan tidak kembali ke bentuk awal. *Midship* menyimpan energi internal tersebut dalam bentuk deformasi. Energi Internal yang disimpan oleh *midship* setelah tubrukan pada kecepatan 8 knot, 10 not, dan 12 knot masing-masing sebesar 80889,1 J; 127429 J; dan 184693 J.

Tabel 12. Nilai Energi Internal yang Dihasilkan dari Tubrukan Kapal

Kecepatan Kapal (Knot)	IE ₀ (J)	IE _{max} (J)	IE ₁ (J)
8	0	101418	80889,1
10	0	160001	127429
12	0	226590	184693

Perbandingan pada Tabel 13 memberikan gambaran persentase energi kinetik yang terserap menjadi deformasi plastis. Selisih antara energi

kinetik awal dengan energi internal puncak mencerminkan sisa energi yang tidak terserap, yang umumnya berasal dari sisa energi kinetik, energi kontak, disipasi numerik, atau bentuk energi lain di *LS-DYNA*.

Tabel 13. Perbandingan Energi Kinetik Awal dan Energi Internal Puncak

Kecepatan (Knot)	Energi Kinetik Awal (J)	Energi Internal Puncak (J)	Selisi h (J)	Selisih (%)
8	108742	101418	7324	6.73 %
10	169909	160001	9908	5.83 %
12	244669	226590	18079	7.39 %

Persentase selisih energi antara energi kinetik awal dan energi internal puncak berkisar 5,83% - 7,39% pada seluruh skenario kecepatan. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi kinetik awal, yang diperoleh langsung dari *output LS-DYNA*, telah diserap oleh deformasi plastis pada struktur target. Sisa energi yang tidak terserap kemungkinan besar terdistribusi ke bentuk energi lain seperti energi kontak, energi kinetik residual, dan disipasi numerik. Variasi kecil antar skenario menunjukkan konsistensi model dalam memprediksi respons energi pada tumbukan dengan konfigurasi penabrak *rigid* dan target plastis.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis *side collision* pada kapal perintis menunjukkan hasil besar deformasi, gaya kontak, dan energi internal. Dari hasil analisis yang sudah dilakukan, besar nilai kecepatan kapal penabrak berpengaruh dari ketiga output yang dihasilkan tadi. Semakin cepat kecepatan yang diberikan pada kapal penabrak, maka deformasi sisi lambung pada kapal perintis semakin besar. Semakin cepat

kecepatan pada kapal penabrak, besar gaya kontak dan energi Internal yang diterima *midship* kapal juga semakin besar. Dari tiga kecepatan yang dijadikan sebagai variable yaitu, 8 knot, 10 knot, dan 12 knot, dihasilkan gaya kontak maksimum masing-masing sebesar $1,48 \times 10^6$ N, $1,81 \times 10^6$ N, dan $1,99 \times 10^6$ N, serta energi internal sebesar masing-masing 101418 J, 160001 J, dan 226590 J. Setelah tubrukan, *midship* menyimpan energi internal dalam bentuk deformasi permanen. Hasil menunjukkan bahwa pada kecepatan 8 knot, 10 knot, dan 12 knot, *midship* menyimpan energi sebesar masing-masing 80889,1 J; 127429 J; dan 184693 J

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Azhar dan T. Agung K, “Standarisasi Harga Pembangunan Kapal Perintis,” *J. Teknol. Marit.*, vol. 2, no. 1, hal. 1–6, 2019, doi: 10.35991/jtm.v2i1.902.
- [2] M. Iqbal dan R. Good, “Pengaruh Anti-Slamming Bulbous Bow Terhadap Gerakan Slamming Pada Kapal Perintis 200 DWT,” *Kapal*, vol. 13, no. 1, hal. 45–54, 2016.
- [3] Biro Komunikasi dan Informasi Publik Kementerian Perhubungan, “Dukung Program Tol Laut, 50 Kapal Perintis dan 3 Kapal Perambuan Mulai Dibangun,” 2015. <https://dephub.go.id/post/read/dukung-program-tol-laut,-50-kapal-perintis-dan-3-kapal-perambuan-mulai-dibangun> (diakses Jun 17, 2025).
- [4] Indonesia, *UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA NOMOR 17 TAHUN 2008 TENTANG PELAYARAN*. 2008.
- [5] EMSA, “Annual overview of marine casualties and incidents 2020,” Lisbon, Portugal, 2020.
- [6] M. Kendek, I. Iskandar, I. D. Satria, dan A. W. Bayuntara, “Studi Kasus Analisis Hasil Investigasi Komite Nasional Keselamatan Transportasi (Knkt) Terhadap Penyebab Tubrukan Kapal Di Perairan Indonesia,” *JPB J. Patria Bahari*, vol. 2, no. 2, hal. 1–10, 2023, doi: 10.54017/jpb.v2i2.60.
- [7] P. Marlina, A. Umyati, dan F. Teknik, “Kajian Kecelakaan Kapal di Pelabuhan Banten Menggunakan Human Factors Analysis and Classification System (HFACS),” *J. Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 3, no. 2, hal. 46–52, 2014.
- [8] A. R. Hermawan, “Analisa Dinamis Jacket Fixed Platform Akibat Tubrukan Kapal Berbasis Resiko Studi Kasus : Bekapai Quarters Platform Risk Based Dynamic Analysis of Fixed Jacket Platform Due To Ship Impact Case Study : Bekapai Quarters Platform,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2015.
- [9] O. Ozguc, “Structural damage of ship–FPSO collisions,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 18, hal. 1–35, 2017.
- [10] A. R. Prabowo, J. M. Sohn, D. M. Bae, dan J. H. Cho, “Performance assessment on a variety of double side structure during collision interaction with other ship,” *Curved Layer. Struct.*, vol. 4, no. 1, hal. 255–271, 2017, doi: 10.1515/cls-2017-0017.
- [11] P. Y. Ginting, A. F. Zakki, dan W. Amiruddin, “Simulasi Tubrukan Ruang Muat Kapal Bulk Carrier 75.000 DWT Dengan Kapal Tanker Bertipe Haluan Ram Bow dan Kapal LNG Bertipe Haluan Cylindrical Bow di Wilayah Perairan Pelabuhan,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 2, no. 3, hal. 74–81, 2014.
- [12] A. R. Prabowo, D. M. Bae, J. M. Sohn, A. F. Zakki, B. Cao, dan Q. Wang, “Analysis of structural damage on the struck ship under side collision scenario,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 3, hal. 1761–1771, 2018.
- [13] A. R. Prabowo, D. M. Bae, J. M. Sohn, dan B. Cao, “Energy behavior on side structure in event of ship collision subjected to external parameters,” *Heliyon*, vol. 2, no. 11, 2016, doi: 10.1016/j.heliyon.2016.e00192.
- [14] A. R. Prabowo, S. J. Baek, J. H. Byeon, D. M. Bae, J. H. Cho, dan J. M. Sohn, “Investigation on the Structural Damage of a Double-Hull Ship, Part I – Ship Collision,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, hal. 935–942, 2017.
- [15] D. Chen, “Simplified ship collision model,” *Virginia Polytech. Inst. State Univ.*, no. January, 2000, [Daring]. Tersedia pada: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05022000->

10450010/unrestricted/etd.pdf.

- [16] Y. A. Nasser, A. Aliraqi, dan B. E. D. Ali, "Collision Analysis of Ship Side," *Adv. Mater. Res.*, vol. 199–200, hal. 119–125, 2011.
- [17] A. R. Prabowo, D. M. Bae, J. M. Sohn, A. F. Zakki, B. Cao, dan Q. Wang, "Analysis of structural behavior during collision event accounting for bow and side structure interaction," *Theor. Appl. Mech. Lett.*, vol. 7, no. 7, hal. 6–12, 2017.
- [18] E. Didik dan J. Mardjuki, "Analisa Pengaruh Defromasi Plastis Terhadap Struktu Mikro dan Kekerasan Pada Baja ST 42," *Transmisi*, vol. XI, hal. 19–26, 2015.
- [19] R. C. Hibbeler, *MECHANICS OF MATERIALS EIGHTH EDITION*. Pearson, 2011.
- [20] S. Islam, K. Taky, dan N. J. Omaia, "Finite Element Modeling and Simulation of Collision Analysis of a Ship," vol. 25, no. 1, 2025.
- [21] A. R. Prabowo, D. M. Bae, J. M. Sohn, dan A. F. Zakki, "Evaluating the Parameter Influence in the Event of a Ship Collision based on the Finite Element Method Approach," *Int. J. Technol.*, vol. 7, no. 4, hal. 592–602, 2016, doi: 10.14716/ijtech.v7i4.2104.
- [22] H. Hasanudin, W. D. Aryawan, A. Zubaydi, dan T. Putranto, "Dynamics Finite Element for Ship Damage Collision Analysis," *IPTEK J. Proc. Ser.*, vol. 0, no. 2, hal. 120, 2017, doi: 10.12962/j23546026.y2017i2.2308.
- [23] W. Wu, Y. Yang, J. Zhang, dan J. Lu, "Study on striking ship with loading impact on the performance of the double hull oil tanker collision," *Polish Marit. Res.*, vol. 25, hal. 42–48, 2018, doi: 10.2478/pomr-2018-0072.
- [24] A. R. Prabowo, D. M. Bae, J. M. Sohn, A. F. Zakki, dan B. Cao, "Rapid prediction of damage on a struck ship accounting for side impact scenario models," *Eng. (De Gruyter)*, vol. 7, hal. 91–99, 2017.
- [25] K. Wisniewski, "The Effect of Selected Parameters on Ship Collision Results by Dynamic FE Simulations," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 39, no. 10, hal. pp 985–1006, 2003, [Daring]. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00143-9](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00143-9).
- [26] S. Zhang, "The Mechanics of Ship Collisions," *Ocean Eng. J. - Dep. Nav. Archit. offshore Eng. - Tech. Univ. Denmark*, no. January, hal. 1–185, 1999.
- [27] N. A. Dzikron dan T. Yulianto, "Analisis Tegangan Haluan Kapal Akibat Tubrukan," *J. Tek. ITS*, vol. 8, no. 2, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v8i2.45284.
- [28] A. R. Prabowo, D. M. Bae, B. Cao, A. F. Zakki, dan G. D. Haryadi, "Study on Collision Between Two Ships Using Selected Parameters in Collision Simulation," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 15, hal. 63–72, 2016.
- [29] I. Pill dan K. Tabri, "Finite Element Simulations of Ship Collisions: A Coupled Approach to External Dynamics and Inner Mechanics," *Ships Offshore Struct.*, vol. 6, hal. 59–66, 2011.
- [30] J. Xia, "Finite Element Analysis of Ship Collisions," Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [31] R. Agustian, P. Mulyatno, dan 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, hal. 675–684, 2016.
- [32] A. R. Prabowo, H. Nubli, dan J. M. Sohn, "Energy dissipation of ship structures subjected to impact loading: A study case in side collision," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 27, no. 2019, hal. 171–178, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.07.023.
- [33] J. Hasil, K. Ilmiah, M. H. Pratama, H. Yudo, dan P. Mulyanto, "JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, hal. 426, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/nav al>.

- [34] O. Mursid, I. P. Mulyatno, dan 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, hal. 514–523, 2015, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/viewFile/10529/10222>.
- [35] S. Ilmiah, “Analisis tegangan lambung kapal tanker akibat tubrukan,” *Inst. Teknol. SEPULUH Nop. SURABAYA*, 2019.
- [36] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules for Hull – Volume II: Hull Structures*. Jakarta: PT Biro Klasifikasi Indonesia (Persero), 2025.