



Pemodelan Simulasi *Drop Test* Sebagai Evaluasi Kekuatan Lambung Kapal Aluminium

Wisnu Adha Tri Nugraha¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki²⁾, Tuswan²⁾

Laboratorium Struktur dan Konstruksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

e-mail : wisnuadha@students.undip.ac.id

Abstrak

Aluminium merupakan material yang banyak digunakan dalam pembuatan kapal kecil karena sifatnya yang ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi. Namun demikian, kapal berbahan aluminium memiliki keterbatasan dalam menahan beban benturan berulang yang terjadi akibat fenomena *slamming* saat beroperasi di perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan lambung kapal aluminium terhadap beban impact vertikal melalui simulasi *drop test*. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) menggunakan perangkat lunak LS-DYNA. Model yang disimulasikan adalah kapal patroli tipe speedboat sepanjang 9 meter. Variasi kondisi diuji berdasarkan sudut kemiringan kapal terhadap permukaan air (0° , 5° , dan 15°) serta variasi ketinggian jatuh (0,5 meter dan 1 meter). Simulasi melibatkan interaksi antara struktur lambung kapal dengan fluida menggunakan pendekatan *Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi ketinggian *drop test*, semakin besar tegangan efektif dan tekanan maksimum yang diterima lambung kapal. Tegangan efektif maksimum sebesar 644,70 KPa terjadi pada sudut 0° dengan ketinggian 1 meter, yang menjadi kondisi paling kritis. Tekanan maksimum sebesar 272,24 KPa tercatat pada sudut 5° bagian haluan pada ketinggian 1 meter. Dengan demikian, sudut dan ketinggian impact sangat memengaruhi respons struktural kapal, sehingga perlu diperhatikan dalam perancangan agar kapal mampu menahan beban akibat *slamming* secara optimal.

Kata Kunci : *Drop Test*, *Slamming*, Kapal Aluminium, Kekuatan Struktur

1. PENDAHULUAN

Material aluminium cukup populer digunakan sebagai bahan pembuatan kapal kecil, terutama di negara seperti Amerika Serikat, Australia, dan Selandia Baru. Berat yang ringan, harga terjangkau dan ketahanan yang baik menjadi dasar pemilihan aluminium sebagai material kapal kecil. Dibandingkan dengan kapal *Fiber Reinforced Plastics (FRP)*, kapal Aluminium memiliki keterbatasan khusus dalam fleksibilitas desain [1]. Lambung kapal patroli yang digunakan oleh US Navy juga menggunakan bahan yang terbuat dari aluminium atau fiberglass. Lambung kapal yang berbahan aluminium tidak dapat menahan benturan beruntun dari *slamming* dengan baik serta lambung kapal berbahan fiberglass dapat pecah ketika melewati lautan ganas dengan kecepatan tinggi [2].

Terjadinya *slamming* di bawah lambung kapal merupakan akibat dari kapal yang melaju dengan

kecepatan yang tinggi. Kecepatan tinggi yang menyebabkan haluan kapal terangkat karena gaya angkat hidrodinamis dan kemudian jatuh, menghantam bagian bawah kapal ke permukaan air. Hantaman yang terjadi berubah menjadi impact dalam waktu singkat. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan besar pada lambung kapal [3]. Ketika kecepatan kapal mendekati kecepatan maksimum maka defleksi maksimum dan momen bending akan meningkat pesat. Peningkatan defleksi dan momen bending dapat mencapai lebih dari 65% dan 75% [4].

Terdapat beberapa metode untuk menganalisis dampak dari *slamming* pada struktur dan penentuan scantling pada kapal kecil seperti yang tertulis di dalam ISO 12215-5 [5]. Salah satu metode tersebut yakni melalui *drop test method* atau tes menjatuhkan. Besarnya *slamming* dapat diperkirakan dari tekanan impact kapal yang bergerak di gelombang ketika mendekati tekanan

impak pada model irisan dua dimensi yang menabrak air.

Sung-Riong Lee et al., [6]. menyelidiki keamanan struktur lambung dari kapal berbahan *Polyethylene* melalui *drop test method*. Dikarenakan keamanan struktur kapal *Polyethylene* tidak ditentukan di dalam aturan teknis yang dibuat oleh *Korea Register*. Maka dilakukan uji simulasi *drop test* yang mengikuti standar ISO 12215-5. Dan didapatkan hasil *drop test* untuk perahu *polyethylene* dengan ketebalan 10 mm mengalami tingkat deformasi lambung pada panjang, lebar, dan kedalaman menjadi 0,2%, dan elastisitas pulih ke kondisi semula

Tao Lu et al., [7]. juga melakukan studi eksperimental metode *drop test* dengan menambahkan variasi ketinggian dan sudut kemiringan untuk menyelidiki pengaruh kecepatan masuk dan pengaruh sudut terhadap dampak yang diperoleh. Melalui pendekatan dua arah menggunakan *software* CFD STAR-CCM+ dan Abaqus untuk menganalisis pengaruh fleksibilitas struktur terhadap fenomena *slamming* pada model kapal. Penelitian ini menunjukkan bahwa bagian bawah haluan merupakan area yang menjadi perhatian utama untuk masalah benturan dengan gelombang.

Pada penelitian yang dilakukan Wang et al., [8] dan Liu et al., [9] sama-sama menggunakan metode *drop test* untuk menyelidiki beban *slamming*, namun dengan pendekatan berbeda. Menurut Wang et al., eksperimen dilakukan sepenuhnya secara fisik tanpa simulasi, dengan fokus pada efek *waterjet* akibat *bottom slamming* dari lambung utama trimaran; mereka menyimpulkan bahwa keberadaan *bottom slamming* dapat mengurangi tekanan *slamming* pada *cross deck*. Di sisi lain, Liu et al. menggabungkan eksperimen dengan simulasi CFD dua dimensi untuk model buritan kapal, dan menemukan bahwa hasil simulasi 2D secara rata-rata melebihi tekanan dampak sekitar 21% dibandingkan data eksperimen.

Selanjutnya, Ma et al., [10] dan Xie et al., [11] juga menggunakan pendekatan eksperimental murni untuk memahami karakteristik *slamming* pada struktur kompleks. Menurut penelitian Ma et al., *drop test* pada model SWATH menunjukkan bahwa efek bantalan udara (*air cushion effect*) secara signifikan mengurangi puncak tekanan *slamming* dan menyebabkan tekanan berosilasi dengan beberapa frekuensi. Sementara itu, Xie et al. menyatakan bahwa melalui *drop test* pada buritan kapal tiga dimensi dengan variasi sudut *pitch*, mereka menemukan bahwa kenaikan sudut *pitch* dari 0° ke 15° meningkatkan puncak beban

slamming sebesar 30–60%, dengan fenomena kavitasi sebagai penyebab utama osilasi tekanan.

Yanna Ping et al., [12] melakukan studi eksperimental dan numerik untuk memahami bagaimana bentuk bawah lambung kapal, khususnya keberadaan *bulbous bow*, memengaruhi karakteristik *slamming* saat kapal masuk ke air. Melalui *drop test* pada dua model skala besar yang dijatuhkan dari ketinggian 250 hingga 700 mm, ditemukan bahwa adanya *bulbous bow* menyebabkan pemisahan aliran lebih awal dan menghasilkan tekanan puncak yang tinggi secara lokal, yang berpotensi membahayakan struktur kapal. Sementara itu, Yihang Shan et al., [13] juga melakukan serangkaian uji jatuh bebas pada model *3D bow flare* untuk melihat distribusi tekanan *slamming* secara lebih detail. Mereka menemukan bahwa tekanan akibat benturan kedua (*second slamming*) bisa melebihi tekanan awal, terutama di area dengan pemisahan aliran dan efek rongga udara. Bahkan, di beberapa titik, tekanan eksperimen tercatat hingga sembilan kali lebih besar dari perhitungan teoritis, menunjukkan pentingnya pengujian langsung dalam mengevaluasi keamanan struktur kapal secara realistis.

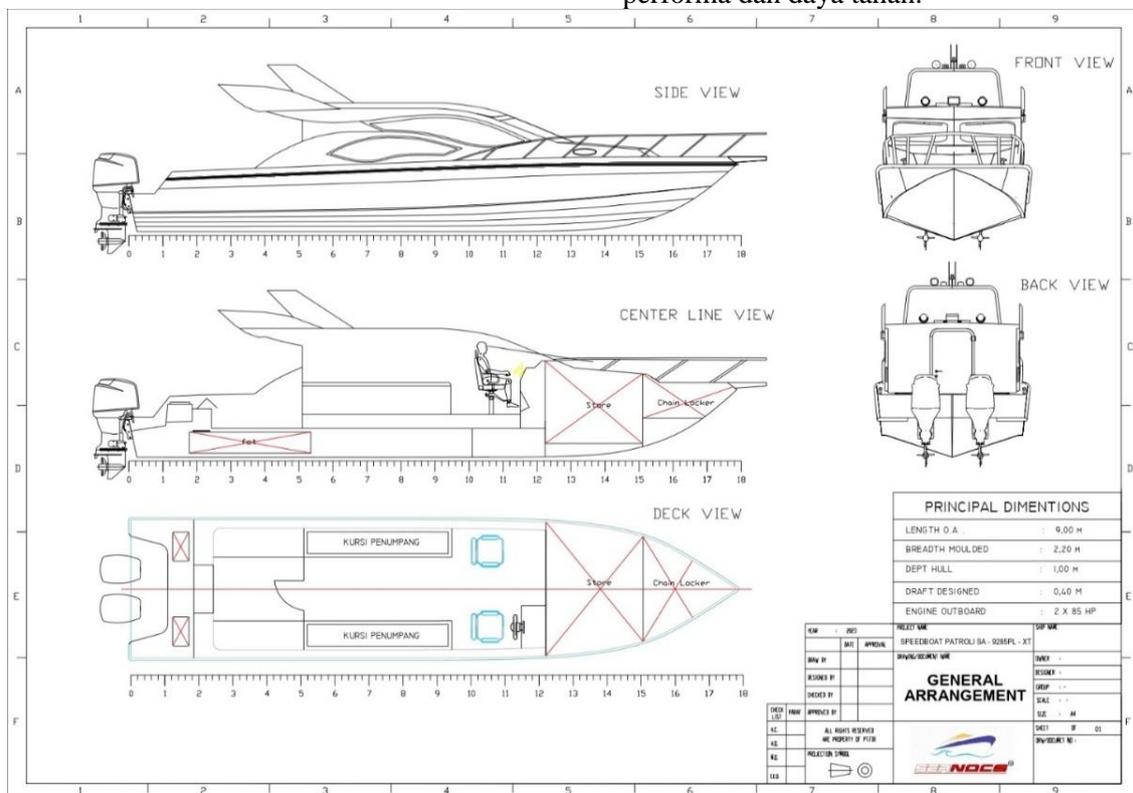
Hang Xie et al., [14] memfokuskan penelitiannya pada dampak asimetris dengan menggabungkan sudut *pitch* dan *heel* dalam *drop test* terhadap model haluan kapal 3D yang terpotong. Hasilnya menunjukkan adanya puncak tekanan ganda dan fenomena tekanan abnormal, di mana tekanan tidak selalu meningkat seiring kenaikan ketinggian jatuh, terutama di area dengan aliran terpisah dan efek rongga udara. Studi ini tidak hanya menekankan kompleksitas dampak asimetris, tetapi juga menyediakan data validasi penting bagi pengembangan metode numerik di masa depan.

Dalam konteks penyelamatan bencana, penelitian oleh Zakki et al., [15] berfokus pada *drop impact test* menggunakan simulasi elemen hingga terhadap desain *cone capsule shaped tsunami lifeboat*, yang dikembangkan untuk mendukung evakuasi tsunami. *Drop test* ini, yang mengikuti prinsip ketahanan terhadap beban dampak seperti yang diatur dalam LSA Code dan mengadopsi pendekatan *penalty method* dalam simulasi, menunjukkan bahwa struktur kapsul mampu mempertahankan integritas struktural saat dijatuhkan dari ketinggian 3 meter, dengan kerusakan terbesar terjadi pada kondisi *side drop*.

Berdasarkan kajian-kajian sebelumnya, terlihat bahwa metode *drop test* menjadi pendekatan yang efektif dalam mengevaluasi

respons struktur kapal terhadap beban slamming, khususnya dalam kondisi masuk air secara vertikal maupun asimetris. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mensimulasikan metode *drop test* pada struktur kapal aluminium dengan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA. Simulasi ini bertujuan untuk menganalisis tegangan dan tekanan yang terjadi akibat dampak saat lambung kapal bersentuhan dengan fluida. Selain itu, variasi sudut dan ketinggian dijadikan sebagai parameter penting untuk memahami pengaruh postur jatuh terhadap distribusi tekanan dan tegangan yang dialami oleh struktur lambung. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam proses evaluasi kekuatan dan keamanan struktur kapal berbahan aluminium terhadap beban dinamis akibat slamming.

2. METODE



Gambar 1. General arrangement

2.1. Pembuatan Model

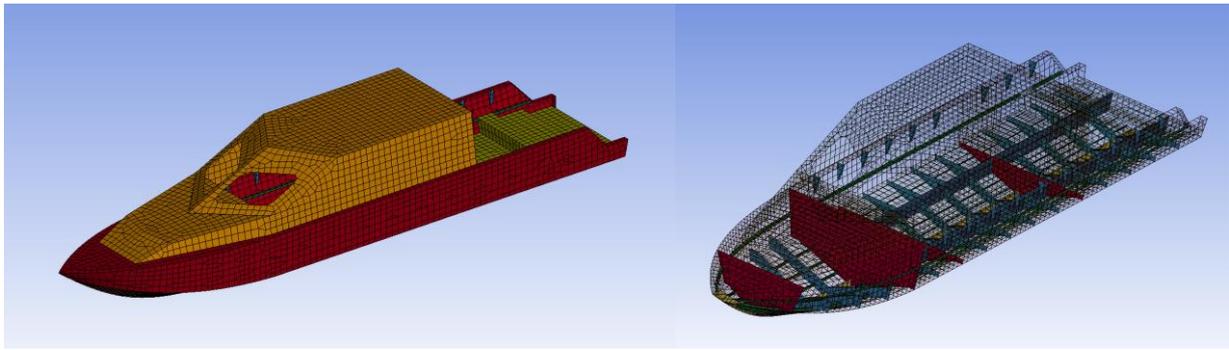
Pemodelan merupakan salah satu aspek penting dalam menganalisis respons struktur terhadap beban dinamis seperti dampak akibat *drop test*. Pada proses ini, seluruh elemen dalam model harus memiliki ukuran dan bentuk yang merepresentasikan kondisi nyata agar hasil simulasi mendekati kenyataan lapangan.

Dalam analisis ini, struktur yang diuji adalah lambung kapal aluminium yang

Penelitian ini menggunakan *speedboat* patroli berbahan aluminium. Dengan ukuran sebagai berikut :

Data	Ukuran
<i>Length Overall</i> (LOA)	9 m
<i>Length of Waterline</i> (LWL)	8,6 m
<i>Breadth</i>	2,2 m
<i>Height</i>	1 m
<i>Draft</i>	0,4 m
<i>Coefficient of Block</i> (CB)	0,38.

Kapal ini dirancang untuk manuver yang gesit serta memiliki kecepatan tinggi, menjadikannya ideal untuk operasi patroli di perairan dangkal maupun lepas pantai. Desain kapal mengutamakan efisiensi hidrodinamik serta stabilitas, dengan material aluminium yang ringan dan tahan korosi sebagai pilihan utama untuk meningkatkan performa dan daya tahan.



Gambar 2. Konstruksi *Speedboat* Patroli

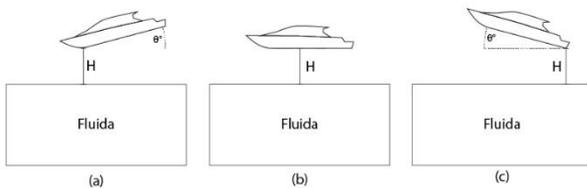
Material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *Aluminium Alloy 5083*. Dengan ketebalan pelat kapal yaitu 4 mm, mengikuti spesifikasi desain teknis *speedboat* patroli.

Tabel 2. *Mechanical properties aluminium alloy 5083*

Deskripsi	Ukuran
Massa Jenis	2660 kg/m ³
Modulus Young	72 GPa
Poisson Ratio	0,33
Shear Modulus	26,44 GPa

2.2. Pemodelan Simulasi

Pemodelan *drop test* yang akan disimulasikan melibatkan variasi sudut dan ketinggian jatuh kapal, Model kasus yang disimulasikan sebagai berikut:



Gambar 3. Pemodelan Sudut Jatuh *Drop Test*

Gambar 4 menunjukkan tiga variasi postur kapal saat melakukan *drop test* terhadap permukaan fluida. Pada konfigurasi pertama, menampilkan buritan kapal dalam posisi terangkat dengan sudut 5° dan 15°, yang menyebabkan haluan menjadi bagian pertama yang menyentuh fluida. Konfigurasi kedua memperlihatkan posisi horizontal, di mana bagian tengah kapal (*midship*) menjadi bagian pertama yang mengalami kontak dengan fluida.

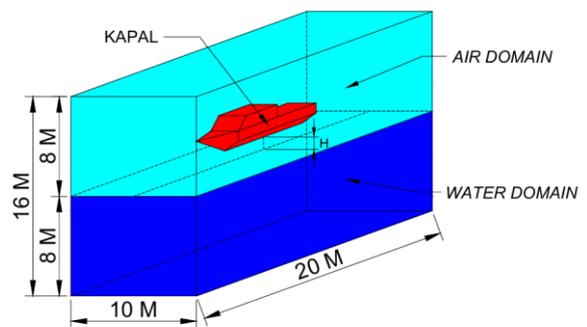
Sementara itu, konfigurasi ketiga haluan kapal berada dalam posisi terangkat dengan sudut kemiringan sebesar 5° dan 15°, sehingga bagian buritan menyentuh permukaan fluida terlebih dahulu. Variasi sudut ini digunakan untuk menganalisis pengaruh postur jatuh terhadap distribusi tekanan dan tegangan yang terjadi pada lambung kapal. Pemilihan sudut 5° dan 15° sebagai variabel dalam penelitian ini karena sudut tersebut

yang paling memungkinkan untuk terjadi. Pada tiap sudut ini akan memiliki variasi ketinggian yaitu 0,5 meter dan 1 meter untuk ketinggiannya. Kecepatan jatuh yang digunakan merupakan percepatan gravitasi yaitu 9,8 m/s². Variasi ini dirancang untuk mengevaluasi respons kapal terhadap kondisi dan ketinggian jatuh yang berbeda.

Tabel 3. Variabel simulasi

Posisi	Sudut (°)	Ketinggian (m)
Haluan Terangkat	5	0,5
	15	0,5
Horizontal	0	0,5
Buritan Terangkat	5	0,5
	15	0,5

2.3. Pendefinisian Domain



Gambar 4. Pemodelan *domain* pada simulasi Penelitian *drop test* ini menggunakan dua *domain* utama, yaitu *air domain* dan *water domain*. *Domain* yang digunakan didasarkan pada penelitian *Free-Fall Lifeboat*. Pada penelitian ini, kedua *domain* memiliki ukuran identik sebesar 20×10×8 meter. Material pada *domain* ini menggunakan keyword **MAT_NULL* yang kemudian didefinisikan menggunakan *Equation of State (EOS)* [13]. Penggunaan keyword **MAT_NULL* bertujuan untuk merepresentasikan media fluida yang memiliki karakteristik tekanan tanpa mempertimbangkan kekuatan geser. Pada setiap sisi terluar dari kedua *domain* diberikan *boundary condition* untuk memastikan kestabilan simulasi serta mengontrol interaksi antara *domain*

dengan lingkungan sekitarnya. Pemberian *boundary condition* ini juga membantu mencegah terjadinya refleksi gelombang yang dapat mengganggu hasil simulasi.

Dalam analisis ini, metode *Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)* diterapkan untuk mensimulasikan dampak yang terjadi pada air, sehingga memungkinkan representasi yang lebih akurat terhadap perubahan bentuk dan dinamika fluida akibat interaksi eksternal. Pendekatan *ALE* memberikan fleksibilitas dalam menangani perpindahan *mesh* serta deformasi fluida, sehingga meningkatkan keakuratan hasil simulasi *drop test*. Metode *ALE* merupakan pendekatan numerik yang menggabungkan keunggulan metode *Lagrangian*, yang mengikuti pergerakan material, dengan metode *Eulerian*, yang berfokus pada ruang tetap. Dengan demikian, metode ini sangat efektif untuk simulasi yang melibatkan deformasi besar dan perubahan volume yang signifikan.

Selain itu, penerapan metode *ALE* dalam penelitian ini memungkinkan pengamatan perilaku fluida secara lebih rinci, seperti pembentukan *splash* dan pola gelombang akibat benturan. Hasil simulasi tersebut akan menjadi dasar dalam mengevaluasi karakteristik benturan *Free-Fall Lifeboat* terhadap permukaan air dan mengoptimalkan desain struktur agar mampu mereduksi dampak benturan secara efektif. Oleh karena itu, akurasi dalam pemodelan *domain* serta penerapan metode *ALE* menjadi kunci utama dalam mendapatkan hasil simulasi yang representatif dan dapat diandalkan.

2.4. Pendefinisian Elemen

Pendefinisian elemen dan *mesh* sangat krusial dalam simulasi untuk memastikan akurasi hasil dan efisiensi komputasi [16]. Pemilihan ukuran *mesh*

harus seimbang pada geometri, sementara jenis elemen harus sesuai dengan karakteristik struktur yang dianalisis.

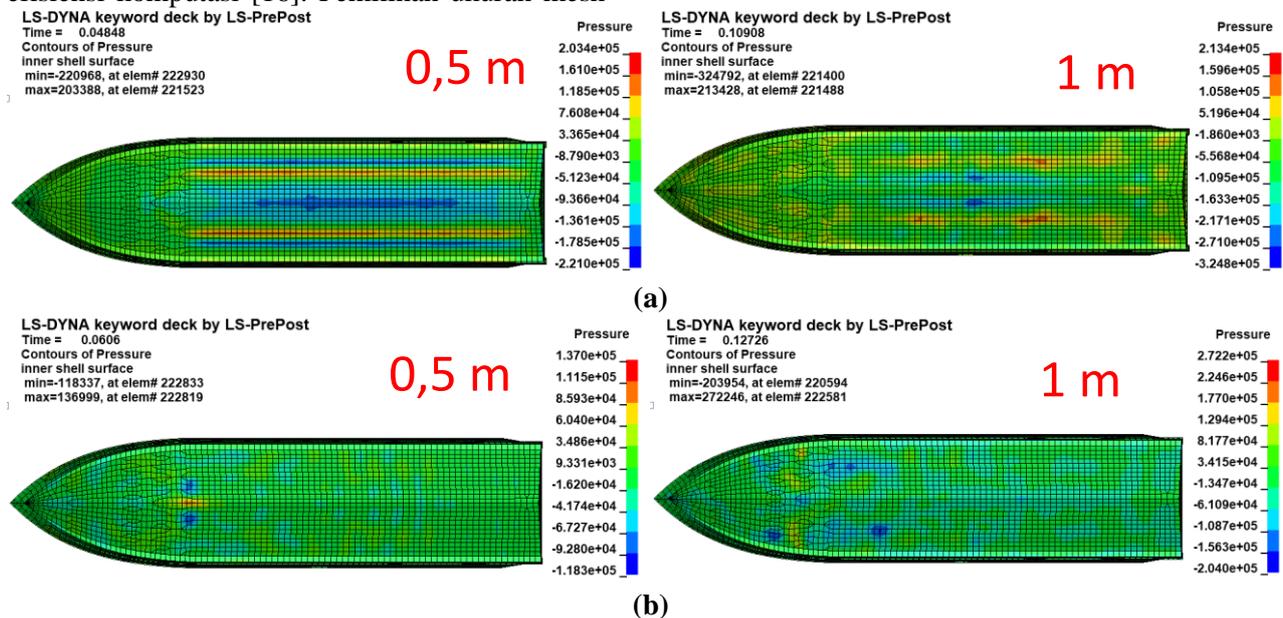
Tabel 3. Ukuran elemen *meshing*

Geometri	Jenis Elemen	Mesh (cm)
Kapal Patroli	SHELL	10x10
Water Domain	SOLID	25x25x25
Air Domain	SOLID	25x25x25

Pada konstruksi lambung kapal aluminium, elemen shell digunakan untuk memodelkan struktur karena karakteristiknya yang sesuai dalam merepresentasikan perilaku material berding tipis serta mampu menangkap respons lentur dan deformasi lokal secara efisien. Elemen shell juga mengurangi beban komputasi dibandingkan dengan elemen solid, tanpa mengorbankan akurasi analisis pada struktur kapal. Sementara itu, untuk water domain dan air domain, elemen solid dipilih agar dapat memodelkan perilaku fluida secara tiga dimensi, termasuk distribusi tekanan dinamis saat terjadi tumbukan. Penggunaan elemen solid pada media fluida ini memungkinkan penerapan model Equation of State (EOS) untuk menggambarkan karakteristik tekanan dan kerapatan fluida selama simulasi *drop test* di LS-DYNA.

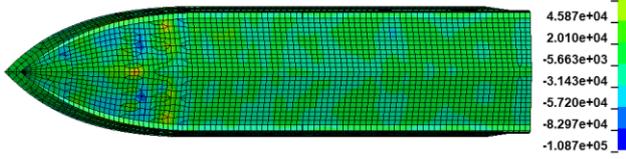
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *running* simulasi dengan menggunakan *software* LS-DYNA menunjukkan bahwa variasi ketinggian dan sudut dalam uji simulasi *drop test* kapal aluminium memberikan dampak signifikan terhadap tekanan maksimum (*Max Pressure*) dan tegangan efektif maksimum (*Max Effective Stress*). Hasil dari simulasi ini juga menunjukkan berbagai kontur tekanan dan tegangan yang dialami pada lambung kapal saat mengalami impak dengan fluida.



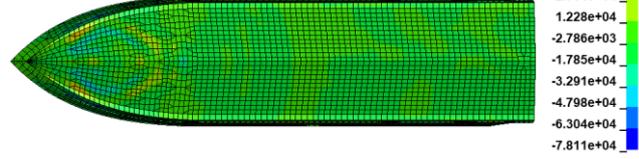
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.07272
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-108734, at elem# 220808
 max=148943, at elem# 220782

0,5 m



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.10302
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-78107, at elem# 220498
 max=72535, at elem# 222427

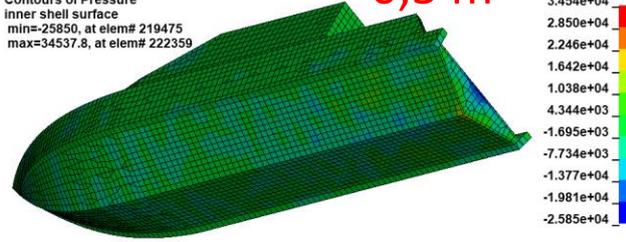
1 m



(c)

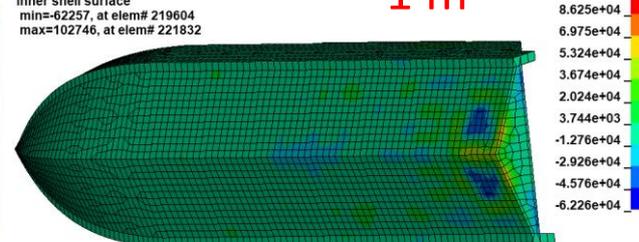
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.05252
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-25850, at elem# 219475
 max=34537.8, at elem# 222359

0,5 m



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.10302
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-62257, at elem# 219604
 max=102746, at elem# 222832

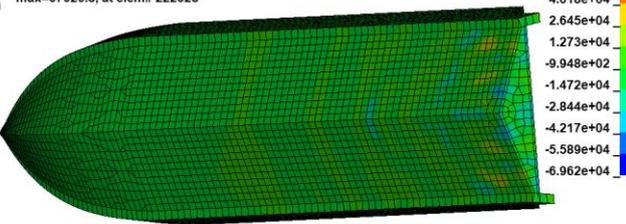
1 m



(d)

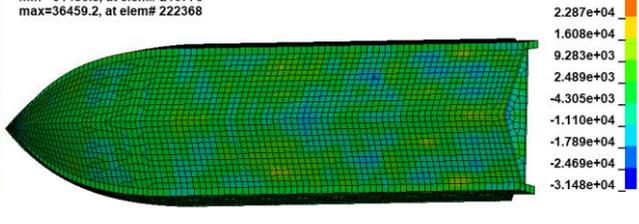
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.05454
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-69616.5, at elem# 219487
 max=67626.8, at elem# 222328

0,5 m



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.11514
 Contours of Pressure
 inner shell surface
 min=-31480.8, at elem# 216775
 max=36459.2, at elem# 222368

1 m

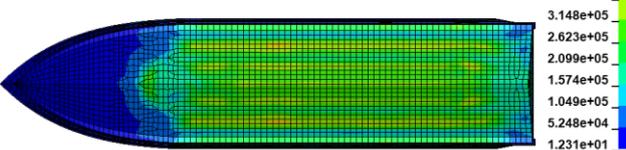


(e)

Gambar 5. Kontur Tekanan Pada Ketinggian H = 0,5 m dan H = 1 m Dengan Variasi Sudut Jatuh.
 (a) 0°, (b) 5° Haluan, (c) 15° Haluan, (d) 5° Buritan, (e) 15° Buritan

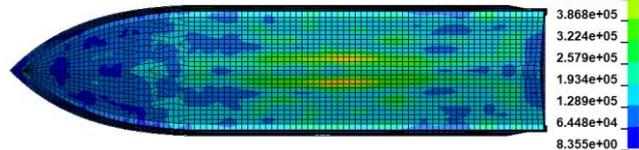
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.04848
 Contours of Effective Stress (v-m)
 inner shell surface
 min=12.3078, at elem# 219404
 max=524656, at elem# 222321

0,5 m



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.10908
 Contours of Effective Stress (v-m)
 inner shell surface
 min=8.3553, at elem# 219331
 max=644700, at elem# 221399

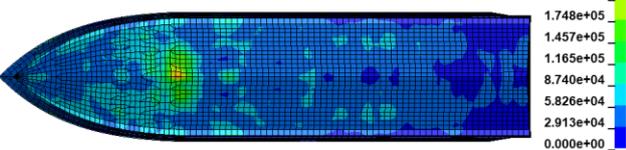
1 m



(a)

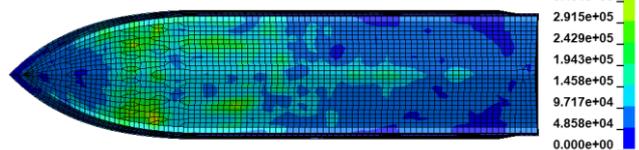
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.0606
 Contours of Effective Stress (v-m)
 inner shell surface
 min=0, at elem# 215184
 max=291319, at elem# 222817

0,5 m

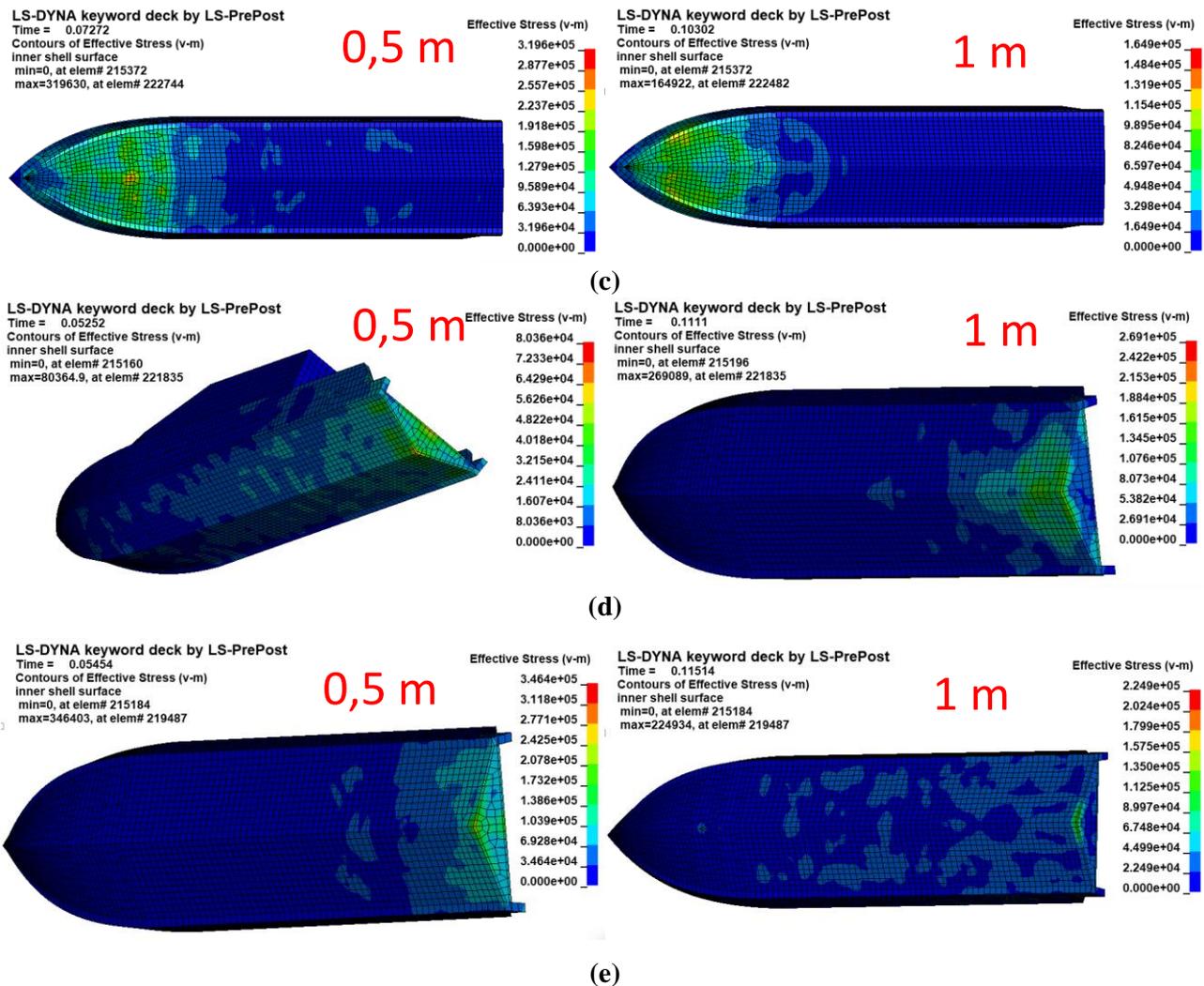


LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.12726
 Contours of Effective Stress (v-m)
 inner shell surface
 min=0, at elem# 215172
 max=485838, at elem# 220596

1 m



(b)



Gambar 6. Kontur Tegangan Efektif Pada Ketinggian $H = 0,5$ m dan $H = 1$ m Dengan Variasi Sudut Jatuh. (a) 0° , (b) 5° Haluan, (c) 15° Haluan, (d) 5° Buritan, (e) 15° Buritan

Grafik kontur tersebut diambil ketika terjadinya impact awal antara lambung kapal dengan water domain. Gambar 5. menunjukkan kontur tekanan yang dialami pada lambung kapal ketika mengalami impact dengan fluida. Tekanan yang dialami lambung kapal terpusat pada bagian yang terkena fluida terlebih dahulu. Dimana pada Gambar 5(a), tekanan yang dialami lebih terkonsentrasi pada bawah lambung kapal. Pada Gambar 5(b) dan Gambar 5(c) tekanan lebih dialami pada haluan dikarenakan haluan kapal mengenai fluida terlebih dahulu. Namun yang membedakan yakni pada gambar 5(c) lebih condong ke ujung haluan kapal. Hal yang sama juga terjadi pada Gambar 5(d) dan Gambar 5(e) namun lebih terpusat pada buritan kapal. Kontur tegangan pada Gambar 6. diambil pada waktu yang sama dengan Gambar 5, Terlihat Gambar 6(a) tegangan efektif yang dialami kapal pada 0,5 meter serta 1 meter terlihat berkurangnya kontur area yang mengalami tegangan. Pada ketinggian 0,5 meter area yang mengalami tegangan efektif lebih luas dibandingkan dengan

ketinggian 1 meter. Hal ini diakibatkan perbedaan ketinggian yang mengakibatkan kecepatan jatuh serta energi potensial yang dialami lambung kapal hingga mencapai fluida berbeda.

Kemudian pada Gambar 6(b) dan Gambar 6(c) kontur tegangan efektif yang dialami berada pada haluan lambung kapal. Titik tegangan tertinggi yang dialami pada sudut 15° lebih berada di depan kapal dibandingkan pada sudut 5° . Pada sudut 5° ketinggian 1 meter mengalami penyebaran kontur tegangan menuju midship kapal. Hal ini berbeda dengan ketinggian 0,5 meter yang dimana kontur tegangan lebih terkonsentrasi pada haluan kapal. Hal ini terjadi diakibatkan dari bedanya kemiringan sudut jatuh yang membuat area kapal yang mengalami impact dengan fluida memiliki kecondongan yang berbeda.

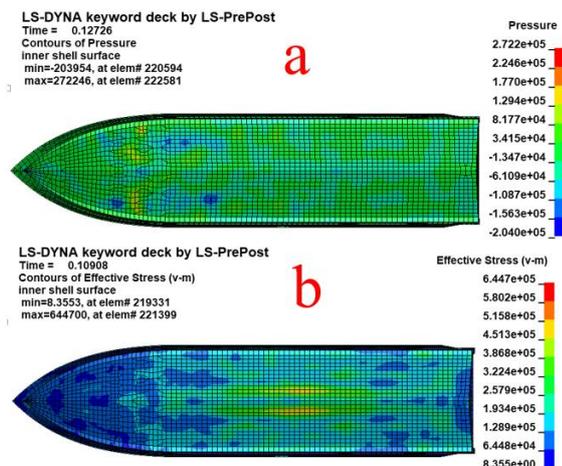
Pada Gambar 6(d) dan Gambar 6(e) kontur tegangan efektif yang dialami lebih terpusat pada buritan kapal. Dimana titik tegangan efektif terpusat pada bagian transom kapal. Pada bagian transom ini tidak mengalami tegangan ekstrem yang terpusat layaknya pada sudut haluan kapal.

Pada bagian transom ini tidak mengalami tegangan ekstrem yang terpusat layaknya pada sudut haluan kapal. Pada bagian transom ini tidak mengalami tegangan ekstrem yang terpusat layaknya pada sudut haluan kapal. Hal ini diakibatkan karena

Tabel 4. Tekanan Maksimum (*Max Pressure*)

Sudut	Ketinggian (m)	Max Pressure (KPa)
Normal		
0°	0,5	203,34
	1	213,43
Haluan		
5°	0,5	136,99
	1	272,24
15°	0,5	148,94
	1	72,54
Buritan		
5°	0,5	34,54
	1	102,75
15°	0,5	69,62
	1	36,46

Data pada Tabel 4 dan Tabel 5 tersebut diambil ketika terjadinya impact antara lambung kapal dengan *water domain*. Hasil simulasi juga menunjukkan nilai tertinggi Max Pressure yang terjadi saat impact adalah 272,24 Kpa, yang tercatat pada sudut 5° dan ketinggian 1 meter. Pada gambar 6a, terlihat area dengan *pressure* terbesar berada pada lambung haluan kapal.



Gambar 7. Nilai Hasil Simulasi Terbesar.
 (a). *Pressure* Pada Sudut 5° dan Tinggi 1 Meter;
 (b). *Max Effective Stress* Pada Sudut 0° dan Tinggi 1 Meter.

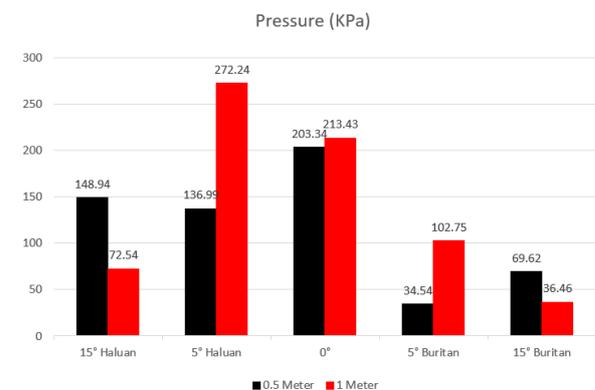
transom kapal memiliki ujung yang lancip, sehingga transom lebih mudah untuk memecah fluida serta menyebarkan konsentrasi tegangan ke buritan kapal.

Tabel 5. Tegangan Efektif Maksimum (*Max Effective Stress*).

Sudut	Ketinggian (m)	Max Effective Stress (KPa)
Normal		
0°	0,5	532,38
	1	644,70
Haluan		
5°	0,5	291,32
	1	485,84
15°	0,5	319,63
	1	164,92
Buritan		
5°	0,5	80,36
	1	269,09
15°	0,5	346,40
	1	224,93

Selain itu, Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada lambung adalah 644,70 Kpa. Tegangan maksimum ini terjadi pada sudut 0° dan ketinggian 1 meter. Pada Gambar 8b, terlihat tegangan maksimum yang dialami kapal pada saat impact terjadi. Tegangan terjadi pada area bilga kapal yang kemudian disebarkan di *bottom hull*.

3.1 Pengaruh Ketinggian



Gambar 8. Grafik Pengaruh Sudut Jatuh terhadap Nilai *Pressure*

Pada Gambar 4.14, menunjukkan bahwa ketinggian memiliki pengaruh terhadap besarnya nilai tekanan yang dialami oleh lambung kapal. *Pressure* terbesar yaitu 272,24 KPa dialami pada

sudut 5° haluan dan ketinggian 1 meter, serta pada sudut tersebut juga memiliki selisih nilai terbesar akibat perbedaan ketinggian. Lalu pada sudut 5° dan ketinggian 0,5 meter mengalami pressure terkecil. Nilai yang hampir setara juga dialami pada sudut 15° buritan dan ketinggian 1 meter. Perbedaan tekanan antar posisi sudut menunjukkan bahwa arah dan titik kontak pertama saat impact turut menentukan besar kecilnya tekanan yang diterima lambung kapal. Hal ini sejalan dengan penelitian Lee et al., bahwa adanya hubungan antara tinggi jatuh kapal dan durasi impact kapal yang mempengaruhi tekanan puncak pada *racing sailboat* [17].

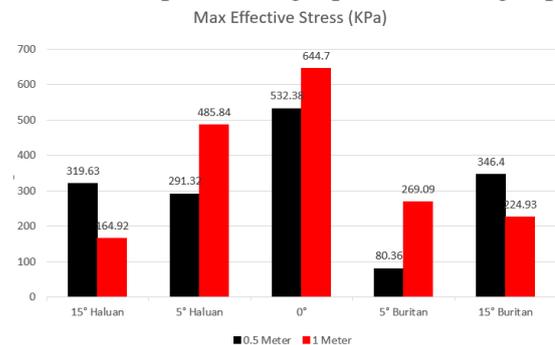
Tabel 6. Persentase Kenaikan Nilai *Pressure* Akibat Perubahan Ketinggian

Sudut	H = 0,5 m	H = 1 m	Persentase
Normal			
0°	203,34	213,43	+4.96%
Haluan			
5°	136,99	272,24	+98.73%
15°	148,94	72,54	-51.30%
Buritan			
5°	34,54	102,75	+197.48%
15°	69,62	36,46	-47.63%

Besar persentase perubahan nilai pressure akibat dari perubahan ketinggian disajikan pada Tabel 6. Dimana pada sudut 0° mengalami kenaikan yang cukup kecil yakni sebesar +4,96%. Sementara itu kenaikan terbesar terjadi pada sudut 5° Buritan dimana kenaikan yang dialami mencapai +197,48%. Lalu pada sudut 15° Haluan dan 15° Buritan mengalami penurunan yang hampir sama akibat dari perubahan ketinggian yakni -51,30% dan -47,63%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada beberapa konfigurasi, peningkatan ketinggian tidak selalu menghasilkan tekanan yang lebih besar, tergantung besar sudut jatuh dan titik impact.

Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi sudut dan posisi titik impact sangat berpengaruh terhadap nilai tekanan yang dihasilkan. Selain itu, peningkatan ketinggian tidak selalu menghasilkan tekanan yang lebih besar secara linier, melainkan dipengaruhi oleh bentuk geometri kapal dan distribusi gaya saat impact terjadi. Misalnya, pada posisi haluan dan buritan, bentuk struktur yang berbeda menyebabkan respons terhadap impact menjadi tidak seragam. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik tekanan pada

tiap konfigurasi sangat penting dalam perancangan struktur kapal agar mampu menahan beban dinamis secara optimal. Analisis ini juga berguna dalam menentukan batas aman tinggi jatuh saat uji drop test dilakukan pada berbagai posisi lambung kapal.



Gambar 9. Grafik Pengaruh Sudut Jatuh terhadap Nilai *Max Effective Stress*

Pada Gambar 9, menunjukkan bahwa ketinggian memiliki pengaruh yang sama juga terhadap besarnya nilai tegangan efektif yang dialami oleh lambung kapal. Nilai tegangan terbesar yaitu 644,7 KPa dialami pada sudut 0° dan ketinggian 1 meter. Pada sudut 5° memiliki selisih nilai terbesar akibat perbedaan ketinggian. Ditunjukkan juga bahwa ketinggian memiliki pengaruh yang sama juga terhadap besarnya nilai tegangan efektif yang dialami oleh lambung kapal. Nilai tegangan terbesar yaitu 644,7 KPa dialami pada sudut 0° dan ketinggian 1 meter. Pada sudut 5° memiliki selisih nilai terbesar akibat perbedaan ketinggian.

Namun pada ketinggian 1 meter, sudut 15° haluan serta 15° buritan memiliki nilai tekanan dan tegangan efektif yang lebih kecil dibandingkan dengan ketinggian 0,5 meter. Hal ini diakibatkan karena area yang mengalami slamming semakin kecil sehingga nilai yang didapatkan juga menjadi berkurang. Bentuk area yang mengalami slamming juga memiliki pengaruh ketika terjadinya impact pada lambung. Bentuk area lambung dan buritan yang lebih tajam mampu untuk memecah fluida sehingga mengurangi dampak benturan pada lambung kapal

Tabel 7. Persentase Kenaikan Nilai *Pressure* Akibat Perubahan Ketinggian

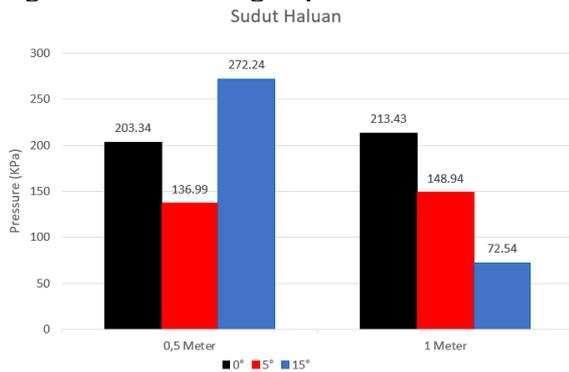
Sudut	H = 0,5 m	H = 1 m	Persentase
Normal			
0°	532,38	644,70	+21.10%
Haluan			
5°	291,32	485,84	+66.77%
15°	319,63	164,92	-48.40%

Buritan			
5°	80,36	269,09	+234.86%
15°	346,40	224,93	-35.07%

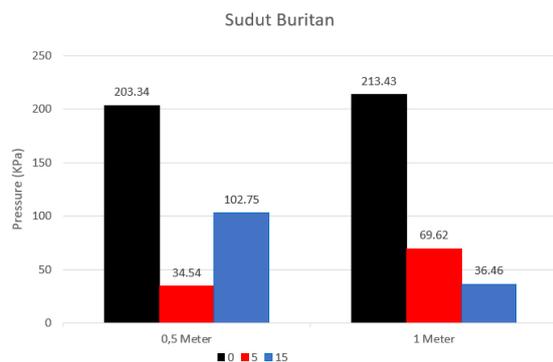
Pada Tabel 7. kenaikan terbesar Max Effective Stress terbesar terjadi pada sudut 5° Buritan dimana kenaikan tegangan yang dialami mencapai +234,86%. Lalu penurunan nilai Max Effective Stress terbesar terjadi pada sudut 15° Haluan dimana terjadi penurunan nilai sebesar -48,40% akibat dari perubahan ketinggian. Sama halnya dengan sebelumnya dimana kenaikan ketinggian jatuh belum tentu membuat besar Max Effective Stress bertambah.

3.2 Pengaruh Sudut

Perbedaan pengaruh sudut juga menjadi variabel dalam penelitian ini. Besar sudut memiliki pengaruh signifikan pada besarnya nilai tekanan dan tegangan efektif yang dialami lambung kapal.



Gambar 10. Grafik Pengaruh Sudut Jatuh terhadap Nilai *Pressure* Pada Sudut Haluan

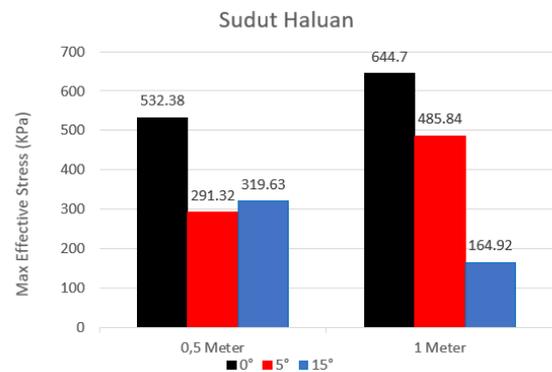


Gambar 11. Grafik Pengaruh Sudut Jatuh terhadap Nilai *Pressure* Pada Sudut Buritan

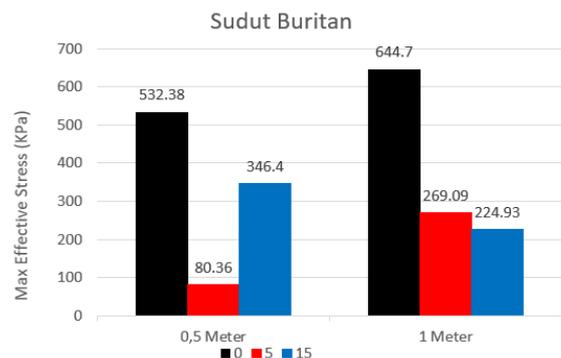
Pada Gambar 10, Hasil analisis simulasi menunjukkan bahwa sudut kemiringan postur kapal sangat memengaruhi nilai tekanan maksimum yang diterima lambung saat terjadi

impak. Pada bagian haluan, tekanan tertinggi sebesar 272,24 KPa tercatat pada sudut 15° dengan ketinggian 0,5 meter. Namun, saat ketinggian dijadikan 1 meter, tekanan pada sudut 15° justru menurun drastis menjadi hanya 72,54 KPa. Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut miring tertentu, bentuk geometri haluan dapat mengakumulasi tekanan pada ketinggian rendah, tetapi menyebarkan gaya impact lebih efektif pada ketinggian yang lebih tinggi.

Sebaliknya pada Gambar 11, pada bagian buritan, tekanan maksimum justru lebih tinggi pada sudut 0°, baik pada ketinggian 0,5 meter (203,34 KPa) maupun 1 meter (213,43 KPa). Peningkatan sudut menyebabkan penurunan signifikan tekanan, di mana pada sudut 5° dan 15°, tekanan maksimum menurun hingga 34,54 KPa dan 102,75 KPa (0,5 m), serta 69,62 KPa dan 36,46 KPa (1 m), berturut-turut..



Gambar 12. Grafik Pengaruh Sudut Haluan terhadap Nilai *Max Effective Stress*



Gambar 13. Grafik Pengaruh Sudut Buritan terhadap Nilai *Max Effective Stress*

Pada gambar 12 dan 13, Berdasarkan hasil simulasi drop test pada variasi sudut kemiringan haluan dan buritan, terlihat bahwa semakin besar sudut kemiringan, maka nilai tegangan efektif yang diterima lambung kapal cenderung menurun. Pada posisi haluan, saat kapal dijatuhkan dari ketinggian 1 meter, tegangan efektif tertinggi terjadi pada sudut 0° yaitu sebesar 644,7 KPa, kemudian menurun menjadi 485,84 KPa pada sudut 5°, dan mencapai nilai terendah 164,92 KPa pada sudut 15°. Pola yang sama juga terlihat pada ketinggian

0,5 meter, di mana tegangan tertinggi sebesar 532,38 KPa terjadi pada sudut 0°, lalu menurun drastis pada sudut 5° dan 15°.

Fenomena serupa juga terjadi pada buritan, di mana nilai tegangan efektif tertinggi juga terjadi pada posisi 0° dengan nilai yang sama yaitu 644,7 KPa (1 meter) dan 532,38 KPa (0,5 meter). Namun, pada sudut 5°, tegangan mengalami penurunan yang sangat signifikan menjadi 80,36 KPa (0,5 m) dan 269,09 KPa (1 m). Menariknya, pada sudut 15°, nilai tegangan justru sedikit meningkat dibanding sudut 5°, yakni mencapai 346,4 KPa (0,5 m) dan 224,93 KPa (1 m).

Perbedaan kenaikan dan penurunan nilai akibat perubahan sudut ini diakibatkan oleh adanya perbedaan luas area lambung kapal yang mengalami dampak. Jika luas area yang mengalami dampak lebih besar, maka lambung kapal akan mengalami besar tekanan dan tegangan yang semakin tinggi, begitu sebaliknya. Sementara itu, bentuk area lambung kapal yang lebih kecil akan lebih mudah untuk memecah fluida sehingga mengurangi besar nilai tekanan yang dialami.

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa sudut 0° menghasilkan tekanan vertikal tertinggi karena gaya dampak diarahkan secara tegak lurus terhadap permukaan kapal. Sebaliknya, pada sudut miring (5° dan 15°), sebagian besar gaya tersebar secara horizontal, sehingga tekanan puncak yang diterima lambung cenderung lebih kecil. Namun demikian, interaksi antara bentuk geometri dan sudut dampak bisa menciptakan anomali, seperti peningkatan tekanan pada sudut 15° di bagian

haluan pada ketinggian 0,5 meter. Hal ini menunjukkan pentingnya mempertimbangkan konfigurasi postur kapal dalam desain untuk mengurangi dampak tekanan akibat slamming vertikal.

3.3 Perhitungan *Safety Factor*

Nilai kekuatan dari tegangan maksimal yang didapat dari hasil data kemudian di verifikasi dengan cara membandingkan hasil analisa data dengan kriteria menurut peraturan BKI. Tingkat kekuatan suatu struktur dapat ditentukan melalui nilai faktor keamanan (*Safety Factor*). Sebuah struktur dianggap aman apabila faktor keamanannya lebih dari 1, yang berarti bahwa tegangan maksimum yang terjadi harus berada di bawah nilai tegangan izin (*allowable stress*).

Dalam penelitian ini, material yang digunakan untuk konstruksi lambung kapal adalah *Aluminium Alloy 5083-H116*, yaitu paduan aluminium yang sering digunakan untuk aplikasi kelautan karena memiliki ketahanan korosi yang baik serta kekuatan tarik yang memadai. Berdasarkan data dari literatur teknis seperti ASM Handbook serta merujuk pada acuan dari BKI (Biro Klasifikasi Indonesia), diketahui bahwa nilai tegangan luluh (*yield strength*) untuk aluminium 5083-H116 adalah sebesar 215 MPa. Oleh karena itu, dalam analisis ini, nilai tegangan ijin diasumsikan sama dengan nilai tegangan luluh material tersebut, yaitu sebesar 215 MPa.

Tabel 8. Perhitungan *Safety Factor* (SF) Menurut Rules BKI.

Sudut	Ketinggian (m)	Max Effective Stress (KPa)	Tegangan Izin (Mpa)	SF	Keterangan
Normal					
0°	0,5	532,38	215	403,85	AMAN
	1	644,70	215	333,49	AMAN
Haluan					
5°	0,5	291,32	215	738,02	AMAN
	1	485,84	215	442,53	AMAN
15°	0,5	319,63	215	672,65	AMAN
	1	164,92	215	1.303,66	AMAN
Buritan					
5°	0,5	80,36	215	2.675,46	AMAN
	1	269,09	215	798,99	AMAN
15°	0,5	346,40	215	620,67	AMAN
	1	224,93	215	955,85	AMAN

Pada Tabel 8, dapat dilihat bahwa nilai safety factor berada di rentang 333,49 hingga

2675,46 yang masuk dalam batas aman sesuai dengan kriteria BKI. Tingginya safety factor ini

menunjukkan bahwa dampak yang terjadi antara lambung dengan fluida tidak mengakibatkan adanya kerusakan atau perubahan permanen pada lambung kapal. Hal ini menjelaskan kenapa tidak ada terjadinya deformasi pada lambung kapal dalam simulasi.

3.4 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Besar dampak yang terjadi pada posisi normal menghasilkan tekanan dan tegangan tertinggi, hal ini menunjukkan bahwa posisi normal merupakan kondisi paling rentan terhadap dampak. Sementara itu sudut buritan menunjukkan distribusi dampak benturan yang lebih baik dan menghasilkan tekanan serta tegangan lebih rendah. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Tao Lu et al., yang menunjukkan bahwa struktur kapal mengalami deformasi minimal dan elastisitasnya tetap pulih setelah uji drop test. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa dengan sudut kemiringan yang lebih besar dapat mengurangi dampak dampak secara signifikan. Serta tingginya safety factor yang menunjukkan bahwa kapal berbahan aluminium mampu untuk menahan dampak dampak dari slamming.

Selain itu, penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hang Xie et al., yang menunjukkan bahwa adanya fenomena tekanan abnormal. Di mana tekanan tidak selalu meningkat seiring kenaikan ketinggian jatuh, terutama pada area dengan aliran terpisah serta adanya efek rongga udara. Dalam penelitian ini juga ditemukan bahwa semakin besar sudut jatuh atau peningkatan ketinggian jatuh juga tidak mengakibatkan terjadinya peningkatan pada besaran nilai tekanan maksimum serta tegangan maksimum

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis simulasi drop test dengan variasi ketinggian dan sudut jatuh pada kapal *speedboat* patroli berbahan aluminium yang telah dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan nilai tertinggi *max pressure* yang terjadi saat dampak adalah 272,24 KPa, yang tercatat pada sudut 5° dan ketinggian 1 meter. Serta bahwa nilai *max effective stress* yang terjadi pada lambung adalah 633,70 KPa yang terjadi pada sudut 0° dan ketinggian 1 meter. Posisi normal dengan sudut 0° menghasilkan tekanan dan tegangan tertinggi, menunjukkan bahwa dampak benturan lebih terkonsentrasi pada satu area. Dengan demikian, desain lambung kapal aluminium harus mempertimbangkan ketahanan terhadap benturan, terutama dalam kondisi posisi normal dengan sudut 0° dan ketinggian jatuh yang lebih tinggi, guna

meningkatkan keamanan dan daya tahan kapal dalam kondisi operasional yang ekstrem.

Sebaliknya, sudut 15° mampu untuk lebih mudah memecah fluida sehingga dampak yang dihasilkan menurun meskipun pada sudut 0° dan sudut 5° mengalami kenaikan nilai. Perbedaan kenaikan dan penurunan nilai akibat perubahan sudut ini diakibatkan oleh adanya perbedaan luas area lambung kapal yang mengalami dampak. Jika luas area yang mengalami dampak lebih besar, Maka lambung kapal akan mengalami besar tekanan dan tegangan yang semakin tinggi, begitu sebaliknya, bentuk geometri area lambung kapal yang lebih kecil akan lebih mudah untuk memecah fluida sehingga mengurangi besar nilai tekanan yang dialami.

Berdasarkan hasil simulasi drop test pada berbagai variasi sudut dan ketinggian, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) berkisar antara 333,49 hingga 2675,46, yang seluruhnya berada jauh di atas batas minimum menurut standar BKI ($SF \geq 1,5-2$). Hal ini menunjukkan bahwa struktur lambung kapal patroli berbahan *aluminium alloy* 5083 mampu menahan beban dampak secara aman tanpa mengalami kerusakan permanen atau deformasi plastis, sehingga dinyatakan layak secara struktural. Nilai yang tinggi ini juga mencerminkan keandalan desain terhadap skenario benturan vertikal.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa uji drop test mampu menjadi analisa dampak dari slamming pada lambung kapal serta tekanan dan tegangan yang dialami pada lambung kapal tidak selalu meningkat dengan seiring kenaikan ketinggian jatuh. Serta uji drop test lebih cocok untuk dilakukan pada kapal berukuran kecil dan berbahan *polyethylene* atau *fiber reinforced plastic*.

Untuk penelitian drop test selanjutnya, disarankan agar dilakukan analisis yang mencakup pengaruh aliran fluida dinamis serta menambahkan variasi pada kecepatan kapal. Serta perlu dilakukan penelitian mengenai fatigue analysis untuk melihat kekuatan lambung kapal aluminium dalam menghadapi beban slamming berulang, sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara lebih realistis dan mendukung evaluasi struktur secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Nakamura, H. Kayanuma, S. Kimura, and M. Kosugi, "A new process for small boat production based on aluminum hot-blow forming (ABF)," *J Mater Process Technol*, vol. 68, no. 3, pp. 196–205, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00102-1).

- [2] M. Vézina and A. Firoozrai, “1st International LS-DYNA ® Users Conference Drop Test into Water and Wave Impact Simulations of a Novel 7-Meter Plastic Boat with LS-DYNA ®.” [Online]. Available: www.SimuTechGroup.com
- [3] K. Sungeun and N. Derek, “SLAMMING IMPACT DESIGN LOADS ON LARGE HIGH SPEED NAVAL CRAFT,” no. SupperFAST’2008, 2008.
- [4] J. Lv and J. L. Grenestedt, “Analytical study of the responses of bottom panels to slamming loads,” *Ocean Engineering*, vol. 94, pp. 116–125, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2014.11.009.
- [5] ISO, “Small Craft-Hull Construction and scantling-Part 5 : Design pressures for monohulls, design stresses, scantling determination,” pp. 49–51, 2008.
- [6] S.-R. Lee, G.-J. Kang, and S.-S. Cho, “Evaluation of Structural Safety of Polyethylene Boats by Drop Test Method,” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 18, no. 5, pp. 531–542, 2017, doi: 10.5762/KAIS.2017.18.5.531.
- [7] T. Lu, J. Wang, K. Liu, and X. Zhao, “Experimental and Numerical Prediction of Slamming Impact Loads Considering Fluid–Structure Interactions,” *J Mar Sci Eng*, vol. 12, no. 5, May 2024, doi: 10.3390/jmse12050733.
- [8] Q. Wang, P. Yu, G. Fan, and G. Li, “Experimental drop test investigation into cross deck slamming loads on a trimaran,” *Ocean Engineering*, vol. 240, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109999.
- [9] X. Liu, F. Liu, H. Ren, X. Chen, and H. Xie, “Experimental investigation on the slamming loads of a truncated 3D stern model entering into water,” *Ocean Engineering*, vol. 252, May 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110873.
- [10] S. Ma *et al.*, “Experimental study on the drop test on wet deck slamming for a SWATH segment model,” *Ocean Engineering*, vol. 285, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115377.
- [11] H. Xie, X. Dai, F. Liu, and X. Liu, “Experimental study on the slamming pressure distribution of a 3D stern model entering water with pitch angles,” *Ocean Engineering*, vol. 291, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.116404.
- [12] Y. Ping, J. Wang, H. Xie, F. Liu, and X. Liu, “Experimental and CFD analysis: Effects of bottom appendages on the slamming characteristics of rigid hull structures during water entry,” *Ocean Engineering*, vol. 319, p. 120195, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120195>.
- [13] Y. Shan *et al.*, “Experimental investigation of slamming pressure on 3D bow flare,” *Ocean Engineering*, vol. 312, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118898.
- [14] H. Xie, X. Dai, H. Ren, and F. Liu, “Experimental characterization on slamming loads of a truncated ship bow under asymmetrical impact,” *Ocean Engineering*, vol. 284, p. 115195, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115195>.
- [15] A. F. Zakki, S. Suharto, D. M. Bae, and A. Windyandari, “Performance on the drop impact test of the cone capsule shaped portable tsunami lifeboat using penalty method contact analysis,” *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 17, no. 2, pp. 233–244, 2019, doi: 10.5937/jaes17-19636.
- [16] Y. Yu, Y. Lin, and Z.-S. Ji, “New method for ship finite element method preprocessing based on a 3D parametric technique,” *J Mar Sci Technol*, vol. 14, pp. 398–407, Sep. 2009, doi: 10.1007/s00773-009-0058-1.
- [17] J. Lee and P. A. Wilson, “Experimental Study of the Hydro-Impact of Slamming in a Modern Racing Sailboat,” *Journal of Sailboat Technology*, vol. 1, no. 8, pp. 1–29, Apr. 2019.