

Optimasi Umur Ekonomis dan Teknis Airbag untuk Operasional PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar

Jibrillah Virgiawan^{1,*}, Syerly Klara¹, Muhammad Iqbal Nikmatullah¹, Ilham Arisandi²

¹Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino km. 6 Bontomarannu, Gowa, Indonesia

²PT. Industri Kapal Indonesia, Jalan Galangan Kapal No. 31, Tallo, Makassar, Indonesia

*Email: virgiawanj21d@student.unhas.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas optimasi umur ekonomis dan teknis airbag sebagai media peluncuran dan pengedokan kapal di PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif dengan analisis teknis dan ekonomis yang didukung simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS. Analisis teknis meliputi perhitungan kebutuhan dan jarak antar airbag, gaya tarik maksimum, tekanan aktual, laju susut umur relatif, serta nilai faktor keamanan. Sedangkan analisis ekonomis dilakukan dengan metode Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) untuk menentukan siklus pemakaian dengan biaya minimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa umur teknis airbag dipengaruhi oleh tekanan kerja aktual, distribusi beban, dan nilai faktor keamanan yang masih berada pada batas aman standar internasional. Dari aspek ekonomis, diperoleh siklus optimal penggantian airbag yang mampu meminimalkan biaya per siklus tanpa melampaui batas umur teknisnya. Dengan demikian, strategi optimasi yang mengintegrasikan aspek teknis dan ekonomis dapat menjadi rekomendasi praktis bagi PT. IKI Makassar dalam meningkatkan efisiensi biaya, keselamatan, dan keberlanjutan operasional peluncuran kapal.

Abstract

Optimization of the Economic and Technical Service Life of Airbags for Operations at PT Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar. This study addresses the optimization of the economic and technical service life of marine airbags used for launching and dry-docking operations at PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar. A quantitative descriptive approach was employed, utilizing technical and economic analyses supported by numerical simulations performed with ANSYS software. The technical analysis encompassed calculations regarding airbag requirements and spacing, maximum tensile force, actual pressure, relative service life degradation, and safety factor values. Meanwhile, the economic analysis utilized the Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) method to determine the usage cycle that minimizes costs. The results indicate that the technical service life of the airbags is influenced by actual working pressure, load distribution, and safety factor values, all of which remained within international safety standards. From an economic perspective, an optimal airbag deployment cycle was identified that minimizes cost per cycle without exceeding the technical service life limits. Consequently, an optimization strategy integrating both technical and economic aspects offers a practical recommendation for PT. IKI Makassar to enhance cost efficiency, safety, and vessel docking operations.

Kata Kunci: Airbag kapal, analisis ekonomis, ANSYS, equivalent uniform annual cost (EUAC), umur teknis

1. Pendahuluan

Salah satu tahapan krusial dalam operasional galangan kapal adalah proses peluncuran (*launching*) dan pengedokan (*docking*). Keberhasilan proses ini tidak hanya berdampak pada kelancaran pembangunan dan pemeliharaan kapal, tetapi juga berpengaruh terhadap efisiensi biaya, keselamatan kerja, dan produktivitas galangan. Dalam beberapa dekade terakhir, metode *airbag launching system* menjadi salah satu alternatif yang banyak digunakan,

terutama pada galangan kapal skala kecil dan menengah yang memiliki keterbatasan fasilitas *slipway* maupun *floating dock* [1]–[4].

Airbag sebagai alat bantu peluncuran kapal mulai dikembangkan dan diterapkan secara luas di Tiongkok pada awal tahun 1980-an dan selanjutnya berkembang menjadi salah satu metode peluncuran kapal yang diakui secara internasional melalui penyusunan standar ISO. Teknologi ini memungkinkan proses peluncuran kapal secara longitudinal tanpa

memerlukan infrastruktur permanen seperti rel peluncur (*launching rail*) atau *cradle*, sehingga memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi dan dapat mengurangi kebutuhan investasi awal pada fasilitas peluncuran [2], [3], [5]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *marine airbag* mampu meningkatkan efisiensi waktu peluncuran dibandingkan metode konvensional, meskipun keuntungan ekonominya sangat dipengaruhi oleh karakteristik galangan, ukuran kapal, serta frekuensi penggunaannya [4], [6].

Meskipun demikian, penggunaan *marine airbag* dalam jangka panjang masih menghadapi berbagai persoalan teknis dan ekonomis. Salah satu aspek yang menjadi perhatian adalah umur teknis (*technical service life*) airbag, yaitu lamanya airbag dapat digunakan secara aman sebelum mengalami degradasi material, penurunan kemampuan menahan tekanan internal, maupun kerusakan struktural akibat pembebanan berulang. Umur teknis tersebut dipengaruhi oleh besarnya beban kapal, jumlah siklus penggunaan, tekanan kerja, kondisi permukaan landasan, serta karakteristik material karet penyusun airbag [2], [5], [7]–[10]. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan kegagalan operasi, seperti distribusi beban yang tidak merata, kerusakan lambung kapal, maupun kegagalan airbag apabila tekanan kerja tidak dikendalikan sesuai prosedur [2], [5], [11].

Dari perspektif ekonomis, airbag juga memiliki umur ekonomis yang perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan aset galangan. Walaupun investasi awal penggunaan airbag relatif lebih rendah dibandingkan pembangunan fasilitas *slipway*, biaya penggantian airbag, biaya inspeksi berkala, risiko kerusakan mendadak, serta waktu henti (*downtime*) akibat kegagalan operasi dapat meningkatkan biaya operasional secara keseluruhan [4], [6], [12]. Oleh karena itu, penentuan waktu penggantian airbag tidak hanya didasarkan pada kondisi teknis, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek ekonomi agar biaya siklus hidup (*life cycle cost*) dapat diminimalkan [2], [12], [13].

Hingga saat ini, penelitian di Indonesia yang secara khusus mengintegrasikan analisis umur teknis dan umur ekonomis *marine airbag* masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih banyak berfokus pada aspek perancangan sistem peluncuran, analisis stabilitas selama peluncuran, maupun evaluasi teknis penggunaan airbag. Akibatnya, keputusan penggantian airbag di lapangan masih banyak didasarkan pada pengalaman teknisi dibandingkan analisis berbasis data. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan penggantian dilakukan terlalu dini sehingga kurang efisien, atau justru terlambat sehingga meningkatkan risiko kegagalan operasi. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi umur teknis dan

umur ekonomis *marine airbag* sebagai dasar pengambilan keputusan manajerial dalam sistem peluncuran kapal di PT Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar [4], [12].

2. Metodologi penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar pada tahun 2025, dengan fokus pada sistem peluncuran kapal KMP Bontoharu menggunakan airbag. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Kedua jenis data tersebut digunakan secara terpadu untuk mendukung analisis teknis, ekonomis, serta simulasi numerik ANSYS yang bertujuan menentukan umur teknis dan ekonomis airbag pada proses peluncuran kapal di PT Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar.

2.1. Data primer

Kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah KM. Bontoharu dimana data kapal ini bisa dilihat pada Tabel 1. Untuk airbag yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 serta untuk spesifikasi airbag dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2. Berdasarkan hasil wawancara dengan Bapak Abdul Aziz, selaku Master Dock PT Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar, diperoleh informasi bahwa jarak antar airbag pada praktik peluncuran kapal tidak bersifat seragam, namun berada dalam rentang 3–4 meter. Penentuan jarak ini mempertimbangkan posisi balok ganjalan di bawah lambung kapal, sehingga jarak di bawah 3 meter dihindari untuk mencegah benturan dengan struktur penyangga. Dalam praktik peluncuran KMP Bontoharu, digunakan 9 unit airbag utama dengan tambahan 1 unit airbag sambungan pada bagian haluan untuk menjaga keseimbangan kapal selama proses rolling menuju air.

Tabel 1. Data kapal

Nama Kapal	KMP. Bontoharu
Length Over All (LOA)	54 m
Length Between Perpendicular (LBP)	47.45 m
Lebar Kapal	14 m
Sarat Air	2.5 m
Tinggi Kapal	3.7 m
Displacement	1140 ton
Deadweight Tonnage (DWT)	220 ton
Lightweight Tonnage (LWT)	920 ton
Cb	0.723

Date : 1/13/2025						
Client						
Company Name : PT INDUSTRI KAPAL INDONESIA (PERSERO)						
Contact Person : Mr. Sulaiman						
Phone :						
Address : Jl. Galangan Kapal No.31, Kalidera Bedas, Kec. Tallo, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90215						
No	Description of goods	Part Number	Qty	Unit	Unit Price	Total Amount
AIRBAG ISO 14409						
1	10 LAYER	1,8 x 12m	6	Unit	Rp. 100.000.000	Rp. 600.000.000

Gambar 1. Data harga beli airbag

Sementara itu, hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa selama proses peluncuran terjadi perpindahan posisi airbag seiring waktu akibat beban dan gaya gesek antara airbag dan permukaan slipway. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh kecepatan perpindahan airbag sebesar 1,65 m pada menit pertama, 1,30 m pada menit kedua, dan 0,90 m pada

menit ketiga. Dari data ini, dihitung kecepatan rata-rata translasi airbag sebesar 1,283 m/menit, yang menjadi acuan dalam perhitungan kecepatan pergerakan airbag dan kecepatan sudut (angular velocity) dan beban dinamis pada simulasi numerik ANSYS. Hasil pengukuran tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 dan juga Gambar 3.

Tabel 2. Data spesifikasi airbag

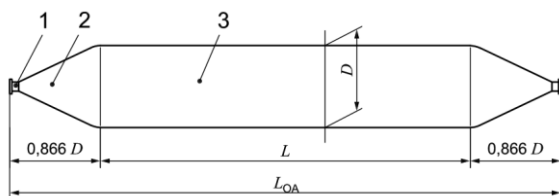
Type No.	D m	a m	b m	c m	d m	e kN/m	Ton/m	f kN	Ton
S	1,8	12	15,1	0,194	0,3D	0,54	383,8	38,4	4605,2
					0,4D	0,72	328,9	32,9	3947,4
					0,5D	0,90	274,1	27,4	3289,5
					0,6D	1,08	219,3	21,9	2631,6
					0,7D	1,26	164,5	16,4	1973,7
					0,8D	1,44	109,6	11,0	1315,8

Keterangan:

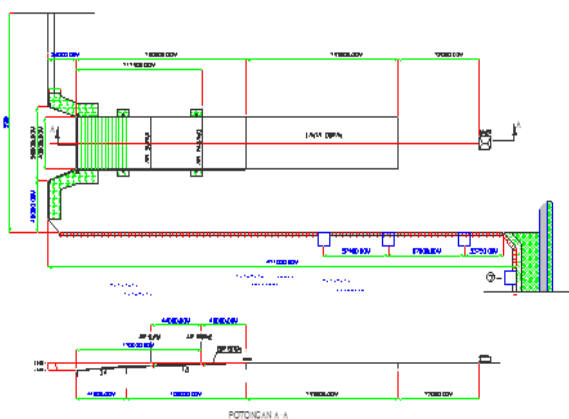
- a : effective length
- b : overall length
- c : rated working pressure
- d : operating height
- e : bearing capacity per meter
- f : bearing capacity per piece of airbag

Tabel 3. Dimensi airbag

Airbag Particular	
Nama Airbag	NANHAI STD 4P2S
Diameter	1.8 m
Panjang Airbag	12 m
Lapisan	10 ply



Gambar 2. Struktur airbag



Gambar 3. Layout airbag PT. Industri Kapal Indonesia (Persero)

Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif deskriptif, mencakup analisis teknis, ekonomis, dan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench (Static Structural). Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap utama yaitu:

- Pengumpulan data lapangan, meliputi pengukuran kondisi aktual slipway, jumlah dan dimensi airbag, data berat kapal, serta tekanan kerja yang digunakan di lapangan sebagaimana yang telah dicantumkan sebelumnya.
- Analisis teknis dan ekonomis, berdasarkan data empiris dan teori dari literatur serta standar internasional (ISO 14409:2011 dan ISO 17682:2013) [2].
- Simulasi numerik ANSYS, untuk memverifikasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada airbag akibat tekanan kerja aktual kapal

2.2. Analisis teknis

Analisis teknis dilakukan untuk menentukan jumlah airbag, tekanan aktual, dan faktor keamanan. Rumus utama yang digunakan adalah:

- Tekanan Aktual Airbag

$$P = \frac{m \times g}{A}$$

Dengan P adalah tekanan aktual (MPa), m adalah massa kapal yang ditumpu satu airbag (kg), dan A adalah luas bidang kontak airbag (m²).

- Laju susut umur relatif

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V$$

Persamaan di atas menggambarkan laju keausan relatif terhadap tekanan maksimum pabrikan.

- Faktor Keamanan (Safety Factor)

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Tekanan maksimum}}{\text{Batas tekanan yang terukur}}$$

Berdasarkan ketentuan ISO 14409:2011, tekanan pecah minimum (burst pressure) airbag harus sekurang-kurangnya tiga kali lebih besar daripada tekanan kerja nominal (rated working pressure). Dengan demikian, faktor keamanan (safety factor) operasi dinyatakan aman apabila bernilai ≥ 2 , yang berarti tekanan kerja aktual masih berada jauh di bawah batas pecah yang diizinkan oleh standar.

2.3. Analisis ekonomis

Aspek ekonomis dianalisis dengan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) untuk menentukan umur ekonomis *airbag* yang paling efisien.

$$EUAC = CR + \text{Annual Operating Cost}$$

dengan CR (Capital Recovery) dihitung sebagai berikut:

$$CR (i\%) = I (A/P, i\%, N) - S (A/F, i\%, N)$$

dimana I adalah harga beli *airbag*, S adalah nilai sisa, i adalah tingkat bunga, dan N adalah umur penggunaan. Umur ekonomis optimal ditentukan dari nilai EUAC minimum yang masih berada dalam batas umur teknis aman.

2.4. Metodologi simulasi ANSYS

Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS Workbench (Static Structural) untuk menganalisis perilaku mekanis *airbag* di bawah beban kapal. Tahapan simulasi dilakukan sebagai berikut:

- Pembuatan Model Geometri
Model terdiri atas tiga komponen utama: kapal, *airbag* (solid deformable body), dan landasan slipway (rigid body). Dimensi *airbag* mengikuti spesifikasi aktual PT. IKI: diameter 1,8 m dan panjang 12 m.
- Definisi Material
Lapisan karet *airbag* dimodelkan sebagai hyperelastic incompressible dengan model Mooney-Rivlin dua parameter, menggunakan konstanta hasil uji laboratorium, slipway didefinisikan sebagai material beton (concrete), dan kapal didefinisikan sebagai material structural steel.
- Boundary Condition (Kondisi Batas)
Pada simulasi numerik menggunakan ANSYS Static Structural, landasan dimodelkan sebagai fixed support untuk merepresentasikan kondisi tumpuan yang bersifat kaku dan tidak mengalami perpindahan. Sementara itu, *airbag* diberikan beban tekanan internal sebesar 0,11–0,33 MPa sesuai dengan rentang tekanan operasional aktual yang terjadi selama proses docking dan undocking kapal.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Analisis umur teknis *airbag*

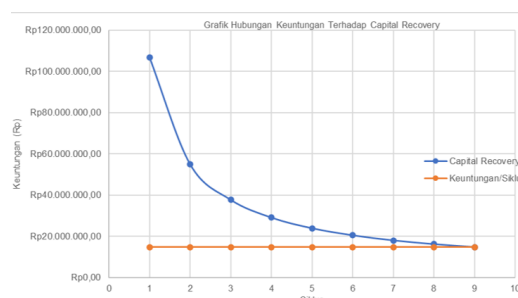
Hasil pengukuran dan observasi lapangan menunjukkan bahwa kapal KMP Bontoharu dengan berat ringan (LWT) sebesar 920 ton menggunakan 9 unit *airbag* utama dan 1 unit *airbag* sambungan. Jarak antar *airbag* berkisar antara 3 – 4 meter, disesuaikan dengan posisi balok ganjal di bawah lambung kapal agar distribusi beban merata. Dengan luas kontak efektif 9 *airbag* adalah $A = 194,4 \text{ m}^2$, maka tekanan

aktual yang bekerja pada setiap *airbag* dihitung menggunakan persamaan 1 adalah sebesar 0,046 MPa, selanjutnya dengan menggunakan persamaan 2 dimana nilai V adalah rasio antara tekanan aktual sebesar 0,046 MPa dan batas tekanan terukur yang bekerja pada *airbag* sesuai spesifikasi sebesar 0,194 MPa maka, diperoleh laju susut umur relatif adalah sebesar 11,95% pada siklus docking dan undocking. Kemudian dengan persamaan 3 diperoleh nilai safety factor sebesar 4,182964.

3.2. Analisis umur ekonomis *airbag*

Tabel 4. Analisa perhitungan capital recovery

n	I (Harga Awal Airbag / Rp)	A/P	S (A/F, i%, N)	CR (Rp)
1	100.800.000,00	1,06	0	106.848.000,00
2	100.800.000,00	0,5454	0	54.976.320,00
3	100.800.000,00	0,3741	0	37.709.280,00
4	100.800.000,00	0,2886	0	29.090.880,00
5	100.800.000,00	0,2374	0	23.929.920,00
6	100.800.000,00	0,2034	0	20.502.720,00
7	100.800.000,00	0,1791	0	18.053.280,00
8	100.800.000,00	0,161	0	16.228.800,00
9	100.800.000,00	0,147	0	14.817.600,00



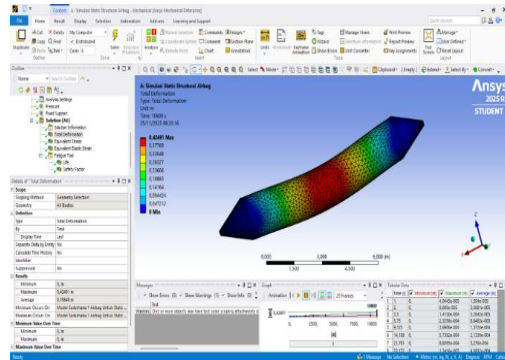
Gambar 4. Hubungan capital recovery dan keuntungan tiap siklus

Dari hasil analisis biaya menggunakan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) seperti pada Gambar 4, diperoleh bahwa umur ekonomis optimal *airbag* dicapai pada siklus ke-6 hingga ke-9. Pada rentang ini, biaya tahunan ekuivalen berada pada titik minimum, yang berarti kombinasi antara biaya penggantian dan biaya operasional mencapai efisiensi tertinggi. Apabila *airbag* digunakan melebihi umur ekonomisnya, biaya perawatan meningkat secara progresif akibat potensi kebocoran, deformasi tetap, dan risiko kegagalan struktural. Oleh karena itu, penggunaan *airbag* yang melebihi siklus ke-9 tidak disarankan karena akan menurunkan efisiensi biaya operasional.

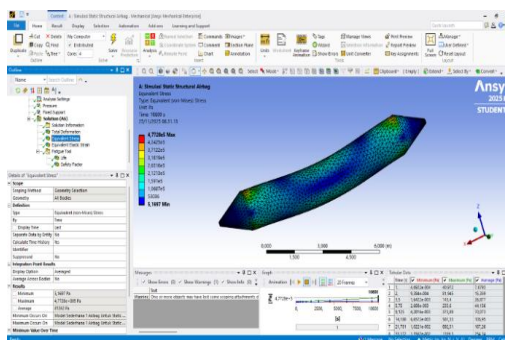
3.3. Analisis hasil simulasi

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi deformasi maksimum sebesar 0,42491 m, sedangkan deformasi minimum bernilai 0 m. Nilai ini masih berada dalam rentang karakteristik normal material elastomer untuk *airbag* berdiameter 1,8 m, di mana deformasi operasi lazim berada pada kisaran 20–30% dari dimensi awal. Distribusi deformasi terbesar terkonsentrasi pada

bagian tengah dan ujung sisi bebas akibat pengaruh tekanan dan batasan tumpuan, tanpa indikasi terjadinya local buckling maupun distorsi ekstrem yang berpotensi menimbulkan kegagalan struktural.

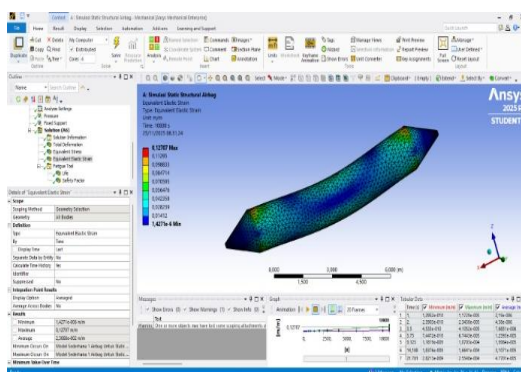


Gambar 5. Hasil simulasi total deformasi pada airbag



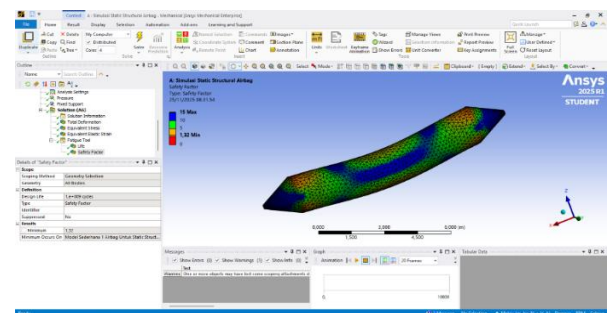
Gambar 6. Hasil simulasi stress (von-Mises Stress)

Gambar 6 menunjukkan tegangan maksimum sebesar 0,477 MPa dan tegangan minimum sebesar 5,17 Pa. Nilai tegangan maksimum ini jauh berada di bawah kekuatan tarik material karet *airbag* bertulang (20–24 MPa), yang menegaskan bahwa struktur berada dalam kondisi sangat aman. Konsentrasi tegangan tertinggi teridentifikasi pada daerah perubahan geometri di kedua ujung *airbag*, sesuai dengan karakteristik distribusi tegangan pada struktur bertekanan dengan kontur tidak seragam, sementara secara keseluruhan tingkat tegangan yang rendah menunjukkan tidak adanya indikasi kondisi mendekati kegagalan material.



Gambar 7. Hasil simulasi equivalent elastic strain

Gambar 7 menunjukkan regangan maksimum sebesar 0,127 ($\approx 12,7\%$) dan regangan minimum sebesar $1,427 \times 10^{-6}$. Nilai regangan maksimum ini masih jauh di bawah batas putus material karet yang umumnya melebihi 400%, sehingga menunjukkan bahwa struktur bekerja dalam zona elastis yang aman. Pola distribusi regangan yang sejalan dengan konsentrasi tegangan mengindikasikan konsistensi respons mekanik terhadap pembebanan, dan menegaskan bahwa deformabilitas *airbag* tidak memasuki kondisi hiperelastik ekstrem maupun berpotensi gagal secara struktural.



Gambar 8. Hasil simulasi safety factor

Gambar 8 menunjukkan nilai *safety factor* maksimum sebesar 15 dan minimum sebesar 1,32. Nilai faktor keamanan minimum yang lebih besar dari satu mengindikasikan bahwa *airbag* masih berada dalam kondisi operasional yang aman, sementara dominasi nilai *safety factor* yang tinggi pada sebagian besar area menunjukkan bahwa material bekerja jauh di bawah batas kapasitasnya. Zona dengan *safety factor* terendah berkorespondensi dengan area konsentrasi tegangan, namun tetap berada dalam batas aman, sehingga dapat disimpulkan bahwa *airbag* memiliki margin keamanan yang besar terhadap pembebanan statik.

Dengan demikian, hasil simulasi memperkuat rekomendasi bahwa strategi optimal adalah menggunakan *airbag* hingga siklus ke-9 dengan perawatan terjadwal, sekaligus mempertimbangkan aspek keselamatan dan efisiensi biaya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai optimasi umur ekonomis dan teknis *airbag* pada operasional PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar, dapat disimpulkan bahwa distribusi tegangan, regangan, dan faktor keamanan *airbag* berdasarkan hasil simulasi ANSYS menunjukkan konsentrasi tegangan terbesar terjadi pada area kontak antara *airbag* dan lambung kapal. Meskipun demikian, nilai regangan yang dihasilkan masih berada dalam batas elastis material dan faktor keamanan (*safety factor*) melebihi nilai minimum standar industri (>2), sehingga konfigurasi *airbag* yang digunakan dinilai layak dan aman untuk mendukung proses *docking*

maupun *undocking* kapal. Analisis umur teknis melalui pendekatan perhitungan laju keausan relatif dan tekanan aktual menunjukkan bahwa airbag masih dapat digunakan hingga mendekati batas kegagalan material akibat kelelahan (*fatigue*) pada siklus ke-8 hingga ke-9. Hasil tersebut juga tervalidasi oleh simulasi ANSYS, sehingga prediksi umur teknis dapat dijadikan dasar yang andal dalam perencanaan operasional. Selain itu, analisis umur ekonomis menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) mencapai titik minimum pada rentang siklus penggunaan ke-6 hingga ke-9, yang menandakan kondisi paling optimal karena biaya operasional dan biaya penggantian berada pada tingkat terendah. Apabila penggunaan airbag diperpanjang melebihi rentang tersebut, biaya perawatan akan meningkat seiring bertambahnya risiko kegagalan, sehingga efisiensi biaya menurun. Oleh karena itu, strategi optimasi yang direkomendasikan bagi PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Makassar adalah melakukan penggantian airbag pada rentang siklus ke-6 hingga ke-9 dengan tetap memastikan bahwa batas umur teknis belum terlampaui, sehingga tercapai keseimbangan antara efisiensi biaya dan keselamatan operasional serta keberlanjutan proses *docking* dan *undocking* kapal secara aman dan ekonomis.

Referensi

- [1] International Organization for Standardization, "Ships and Marine Technology — Ship Launching Air Bags," Geneva, Switzerland, ISO 14409:2011, 2011.
- [2] International Organization for Standardization, "Ships and Marine Technology — Methodology for Ship Launching Utilizing Air Bags," Geneva, Switzerland, ISO 17682:2013, 2013.
- [3] S. Sugeng, M. Ridwan, Suharto, and S. F. Khristyson, "Technical and Economic Analysis of Ship Launching with Slipway and Airbag KM. Sabuk Nusantara 72 in PT. Janata Marina Indah Shipyard Semarang," *Tek. J. Ilm. Bid. Ilmu Kerekayasaan*, vol. 41, no. 3, pp. 225–231, 2020, doi: 10.14710/teknik.v41i3.33710.
- [4] H. Akyildiz and A. Mentis, "Risk Assessment of Launching Airbags Using Functional Resonance Accident Model," *Trans. Marit. Sci.*, vol. 12, no. 2, 2023, doi: 10.7225/toms.v12.n02.005.
- [5] A. N. Gent, *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [6] W. Mars and A. Fatemi, "A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber," *Int. J. Fatigue*, vol. 24, no. 9, pp. 949–961, 2002, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00008-7.
- [7] G. J. Lake and P. B. Lindley, "The Mechanical Fatigue Limit for Rubber," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 9, pp. 1233–1251, 1965.
- [8] L. R. G. Treloar, *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- [9] L. T. Blank and A. J. Tarquin, *Engineering Economy*, 8th ed. New York: Mc Graw-Hill Education, 2018.
- [10] W. G. Sullivan, E. M. Wicks, and C. P. Koelling, *Engineering Economy*, 16th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2015.
- [11] B. S. Dhillon, *Life Cycle Costing for Engineers*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [12] B. S. Dhillon, *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [13] A. C. P. Ningrum, M. Y. Syam, H. Maulidah, J. Wahidah, and C. J. V. Sitorus, "Technical and Operational Analysis of Marine Airbag-Assisted Ship Docking," *Indones. J. Marit. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 137–141, 2025.