



Article Info:

Received 06 May 2026

Accepted 18 June 2026

Published 27 July 2026

Corresponding Author:

Novaria Marsha Yulianto
Department of Shipbuilding
Engineering
Shipbuilding Institute of
Polytechnic Surabaya
E-mail: -

© 2026 Yulianto et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license, allowing unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided proper credit is given to the original authors.



Analysis of Lashing Strength Using FEM and Seakeeping (RAO) for Accident Risk Assessment on Non-Conventional Vessels under Extreme Wave Conditions

Analisis Kekuatan Lashing dengan FEM dan Seakeeping (RAO) untuk Penilaian Risiko Kecelakaan pada Kapal Non Konvensional di Kondisi Gelombang Ekstrem

Novaria Marsha Yulianto ^a, I Putu Arta Wibawa ^a, Kharis Abdullah ^a

^a Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

Abstract

Cargo securing (lashing) on non-conventional vessels plays a crucial role in maintaining cargo safety and vessel stability during voyage operations. This study integrates lashing strength analysis using the Finite Element Method (FEM) with a seakeeping study based on the Response Amplitude Operator (RAO) to assess accident risks under extreme wave conditions. The FEM model was developed for vessel conditions at even keel and at inclination angles of 5°, 10°, 15°, 20°, and 25°, while the seakeeping analysis evaluated roll motion responses at a heading angle of 90° (beam sea), resulting in a maximum wave height of 6.33 meters. Using the AS/NZS 4360 standard, the accident risk assessment identified the lashing tolerance limit up to a 25° inclination angle with the use of M90-type Webbing Sling restraints. Probability analysis of high-wave occurrences based on data from 2016–2020 indicates that waves with a height of 5 meters were the most dominant events, accounting for 1,094 out of a total of 1,863 occurrences. These findings provide practical guidance for designing safer lashing systems and developing effective mitigation strategies for non-conventional vessels operating under extreme wave conditions.

Keywords: Accident Risk Analysis, Finite Element Method (FEM), Lashing, Seakeeping, Extreme Waves

Abstrak

Pengikatan muatan (lashing) pada kapal non-konvensional memiliki peran krusial dalam menjaga keamanan muatan serta stabilitas kapal selama aktivitas pelayaran. Penelitian ini mengintegrasikan analisis kekuatan lashing menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan studi seakeeping berbasis Response Amplitude Operator (RAO) untuk menilai risiko kecelakaan dalam kondisi gelombang ekstrem. Model FEM dikembangkan untuk kondisi kapal pada even keel serta sudut kemiringan 5°, 10°, 15°, 20°, dan 25°, sementara analisis seakeeping mengevaluasi respons gerak roll pada heading angle 90° (beam sea), yang menghasilkan tinggi gelombang maksimum sebesar 6,33 meter. Dengan menggunakan standar AS/NZS 4360, penilaian risiko kecelakaan mengidentifikasi batas toleransi lashing hingga sudut kemiringan 25° dengan pengikatan tali Webbing Sling tipe M90. Analisis probabilitas kejadian gelombang tinggi dari data periode 2016–2020 menunjukkan bahwa gelombang dengan ketinggian 5 meter adalah kejadian paling dominan, yaitu sebanyak 1.094 dari total 1.863 kejadian. Temuan ini memberikan panduan praktis untuk perancangan sistem lashing yang lebih aman dan strategi mitigasi efektif bagi kapal non-konvensional yang menghadapi kondisi gelombang ekstrem.

Kata Kunci: Analisis risiko kecelakaan, Finite Element Method (FEM), Lashing, Seakeeping, Gelombang ekstre

1. Pendahuluan

Indonesia terletak di persimpangan utama jalur perdagangan dunia dengan wilayah laut seluas lebih dari 3,1 juta km² dan tersebar di lebih dari 17 ribu pulau. Laut Indonesia tidak hanya menjadi bagian geografis, tetapi juga berperan sebagai penghubung antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, sekaligus jalur utama lebih dari 60% lalu lintas pelayaran internasional. Kondisi tersebut menjadikan sektor transportasi laut memiliki peran penting dalam pertumbuhan ekonomi, keamanan energi, dan kedaulatan nasional. Keterbatasan jaringan transportasi darat di berbagai wilayah juga menyebabkan transportasi laut menjadi pilihan utama dalam distribusi barang domestik maupun ekspor-impor. Data Kementerian Perhubungan menunjukkan bahwa volume angkutan laut domestik pada tahun 2023 mencapai lebih dari 300 juta ton dan menyumbang lebih dari 70% nilai total perdagangan barang Indonesia (Laut, Dirjen Perhubungan, 2012).

Sebagai negara kepulauan, Indonesia mengoperasikan berbagai jenis kapal, mulai dari kapal petikemas, kapal penumpang, hingga kapal non-konvensional yang dirancang khusus untuk mengangkut muatan tertentu seperti kendaraan, kontainer ringan, maupun peralatan industri. Kapal non-konvensional memiliki karakteristik desain yang berbeda dibanding kapal konvensional, antara lain struktur hull yang lebih tipis, sistem penopang terbatas, serta pusat gravitasi yang relatif lebih tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan respons gerak kapal dan interaksi antara muatan dengan sistem pengikat menjadi lebih sensitif terhadap kondisi gelombang laut. Meskipun transportasi laut memiliki biaya operasional yang relatif lebih rendah dibanding transportasi darat, aspek keselamatan tetap menjadi tantangan utama. Kecelakaan kapal tidak hanya menimbulkan kerugian material, tetapi juga dapat mengancam keselamatan awak kapal dan penumpang serta menyebabkan dampak lingkungan yang signifikan. Salah satu faktor utama penyebab kecelakaan pada kapal non-konvensional adalah kegagalan sistem pengikatan muatan (*lashing*). Pengikatan yang tidak memadai dapat menyebabkan pergeseran muatan, kerusakan struktur, hingga kapal mengalami kemiringan berlebih (*heel*), terguling, atau kebocoran (Perhubungan, Menteri, 2009).

Pemerintah Indonesia telah menetapkan beberapa regulasi terkait sistem pengikatan muatan, antara lain PM No. 39/2016 mengenai standar teknis dan persyaratan bahan *lashing*, PM No. 30/2016 tentang inspeksi dan pemeliharaan sistem pengikatan, serta PM No. 115/2016 mengenai prosedur pengikatan muatan kendaraan. Regulasi tersebut disusun selaras dengan standar internasional yang diterbitkan oleh International Maritime Organization (IMO) dan International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Namun demikian, insiden akibat kegagalan *lashing* masih sering terjadi. Laporan Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) pada tahun 2013 mencatat adanya dua kecelakaan serius yang disebabkan oleh putusnya sistem pengikatan muatan pada kapal non-konvensional dan mengakibatkan kerugian material maupun korban jiwa (Perhubungan, Menteri, 2016a-c).

Kekuatan sistem pengikatan muatan pada kapal non-konvensional telah menjadi fokus berbagai penelitian keselamatan maritim selama beberapa dekade terakhir. Secara umum, sistem *lashing* berfungsi untuk menahan beban dinamis yang timbul akibat pengaruh gelombang, perubahan kecepatan, serta gerakan kapal selama pelayaran. Konsep dasar perilaku material pengikat, baik berupa kawat baja, rantai, maupun *webbing sling*, didasarkan pada parameter *tensile strength*, *yield strength*, dan *safety factor* yang umumnya berada pada kisaran 6–8 untuk memastikan margin keamanan yang memadai (IMO, 2020). Standar internasional seperti SOLAS dan IMO Guidelines on Cargo Stowage and Securing juga menekankan pentingnya spesifikasi material serta prosedur inspeksi berkala guna meminimalkan risiko kegagalan sistem pengikatan (Aziz, 2019).

Dalam upaya mengevaluasi kekuatan sistem *lashing* secara kuantitatif, pendekatan Finite Element Method (FEM) banyak digunakan karena mampu mensimulasikan interaksi antara struktur kapal, muatan, dan elemen pengikat secara detail. Metode ini dapat memberikan informasi mengenai distribusi tegangan, deformasi, serta potensi kegagalan pada sistem pengikatan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada elemen *lashing* tidak terjadi secara merata dan cenderung terkonsentrasi pada titik sambungan pengikat. Studi lain pada kapal Ro-Ro dengan tipe *webbing MC-90* menemukan bahwa peningkatan sudut *heel* dari 5° hingga 25° mampu meningkatkan nilai tegangan lebih dari dua kali lipat dibanding kondisi normal. Penelitian terbaru yang dipublikasikan dalam *Marine Structures* juga

menunjukkan bahwa pendekatan non-linear FEM mampu menggambarkan pengaruh large deformation pada hull dan muatan yang memperbesar tegangan pada sistem lashing, khususnya pada kondisi beam sea atau gelombang datang dari arah samping kapal (Zhang & Wu, 2021). Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Budianto et al. (2020) yang menunjukkan bahwa simulasi menggunakan ANSYS Workbench menghasilkan tegangan maksimum sebesar 15,66 MPa pada sudut heel 25°, yang telah melampaui batas tegangan ijin (Kristanto et al., 2018).

Selain analisis struktural menggunakan FEM, aspek seakeeping juga menjadi komponen penting dalam mengevaluasi respons kapal terhadap gelombang. Analisis seakeeping berbasis Response Amplitude Operator (RAO) digunakan untuk menentukan hubungan antara gerakan kapal, seperti heave, pitch, dan roll, dengan kondisi gelombang yang diterima kapal. Analisis RAO menunjukkan bahwa pada kecepatan 10 knot, gerakan roll mencapai nilai puncak RAO sebesar 6,685 pada kondisi beam sea, sehingga menghasilkan peningkatan beban lateral pada sistem lashing secara signifikan. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Kim & Park (2019) yang menyatakan bahwa gerakan roll merupakan mode gerak paling kritis dalam memicu tegangan berlebih pada sistem pengikat muatan, terutama pada kapal dengan pusat gravitasi tinggi (Kim & Park, 2019). Penelitian lain dari DNV mengenai next-generation container lashing calculation juga menunjukkan bahwa integrasi data RAO dengan spektrum gelombang menghasilkan prediksi kegagalan sistem pengikatan yang lebih akurat dibanding metode deterministik konvensional (Bhattacharya, 1978).

Di samping analisis teknis, pendekatan manajemen risiko juga diperlukan untuk mengevaluasi probabilitas terjadinya kondisi ekstrem beserta dampaknya terhadap keselamatan kapal. Standar AS/NZS 4360 yang saat ini diadopsi dalam ISO 31000 menyediakan kerangka kerja penilaian risiko melalui tahapan identifikasi, evaluasi, dan mitigasi risiko berdasarkan kombinasi probabilitas dan konsekuensi kejadian. Dalam konteks sistem lashing, penilaian risiko dilakukan dengan mengintegrasikan data historis gelombang dan hasil simulasi struktural. Data gelombang Indonesia periode 2016–2020 menunjukkan terdapat 1.094 kejadian gelombang setinggi 5 meter dari total 1.863 kejadian, yang mengindikasikan tingginya probabilitas kapal menghadapi kondisi gelombang ekstrem selama operasi pelayaran. Dengan menggunakan matriks risiko AS/NZS 4360, kondisi kombinasi sudut heel $\geq 20^\circ$ dan tinggi gelombang ≥ 6 meter dikategorikan sebagai risiko “Intolerable” sehingga diperlukan pembatasan operasional dan peningkatan inspeksi sistem pengikatan (AS/NZS 4360, 2004; Novaria Marsha Y., 2023). Temuan serupa juga dilaporkan pada penelitian kapal kontainer di Laut China yang menunjukkan bahwa probabilitas gelombang ekstrem berkontribusi terhadap peningkatan nilai Expected Loss hingga 37% (Ma’ruf, 2020; Romadhoni, 2019).

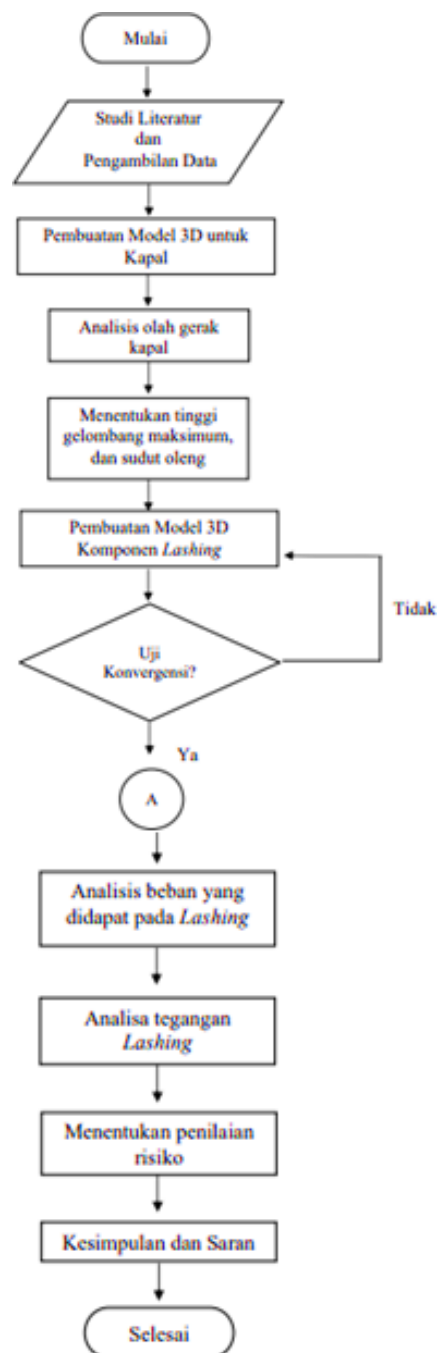
Beberapa penelitian lain juga menyoroti optimasi desain sistem lashing menggunakan pendekatan multifaset. Pendekatan genetic algorithms digunakan untuk menentukan kombinasi material, dimensi, dan titik pengikatan yang mampu meminimalkan tegangan tanpa mengurangi faktor keamanan. Hasil simulasi menunjukkan adanya penurunan tegangan hingga 22% dibanding konfigurasi standar. Selain itu, penelitian mengenai penggunaan jalur pengikatan sekunder (redundancy) menunjukkan peningkatan faktor keamanan hingga 1,5 kali pada kondisi roll 30° pada kapal Ro-Ro (Putra et al., 2016; Satria et al., 2012). Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem lashing tidak hanya memerlukan pendekatan struktural, tetapi juga integrasi antara analisis dinamika kapal, optimasi desain, dan manajemen risiko.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan sistem lashing pada kapal non-konvensional menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan variasi sudut heel 5°–25° dan penggunaan Webbing Sling tipe M90. Penelitian ini juga mengevaluasi respons gerakan kapal melalui analisis Response Amplitude Operator (RAO), khususnya pada kondisi beam sea dengan tinggi gelombang maksimum mencapai 6,33 meter. Selanjutnya, penelitian ini melakukan penilaian risiko kecelakaan menggunakan metode AS/NZS 4360 dengan mengintegrasikan hasil analisis FEM, RAO, dan data statistik gelombang untuk menentukan batas toleransi operasional sistem lashing. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi regulator, operator kapal, dan industri maritim dalam meningkatkan keselamatan sistem pengikatan muatan, mengurangi risiko kecelakaan akibat

kegagalan lashing, serta mendukung pengembangan sistem transportasi laut yang aman, efisien, dan berkelanjutan di Indonesia.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan tahapan terstruktur untuk menganalisis kekuatan sistem lashing pada kapal non-konvensional dan menilai risiko kecelakaan yang berkaitan. Proses metodologi diawali dengan studi literatur dan pengambilan data yang komprehensif untuk memahami kondisi terkini terkait pengikatan muatan, kekuatan material lashing, serta risiko yang muncul akibat gelombang dan gerakan kapal.



Gambar 1 Diagram Alir

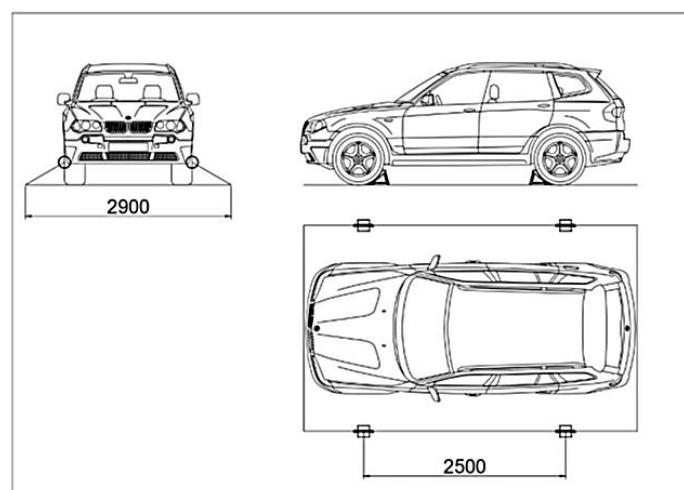
Studi literatur ini membantu menetapkan dasar teori serta mengidentifikasi variabel-variabel penting yang menjadi fokus analisis. Selanjutnya, dilakukan pembuatan model 3D kapal sebagai representasi fisik kapal non-konvensional yang menjadi objek penelitian. Model ini dibuat secara detail dengan menggunakan perangkat lunak pemodelan 3D yang mampu mereplikasi geometri dan struktur kapal secara akurat. Pembuatan model 3D kapal ini penting untuk simulasi gerak kapal dan interaksi antara kapal dengan sistem lashing selama kondisi operasional di laut.

Pada tahap berikutnya, dilakukan analisis olah gerak kapal (seakeeping analysis) untuk mendapatkan pola gerak kapal dalam berbagai kondisi laut dan pelayaran. Analisis ini meliputi simulasi parameter gerak seperti roll, pitch, dan heave kapal yang memberikan gambaran respons kapal terhadap gangguan gelombang dan arus laut. Data hasil simulasi ini selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter dinamis yang berpotensi memberikan beban pada sistem lashing.

Dari hasil simulasi gerak kapal tersebut, peneliti menentukan tinggi gelombang maksimum dan sudut oleng (heel angle) yang menjadi kondisi batas kritis pada kapal. Penentuan parameter ini didasarkan pada data statistik dan kondisi spektral gelombang yang relevan dengan wilayah operasi kapal, sehingga analisis menjadi realistis dan kontekstual. Parameter tinggi gelombang dan sudut oleng ini sangat penting karena merupakan faktor utama yang memengaruhi besarnya gaya dinamis pada sistem pengikatan muatan. Setelah parameter kritis ditetapkan, dilakukan pembuatan model 3D komponen lashing pada kapal yang meliputi elemen-elemen pengikatan seperti rantai, kawat, atau webbing. Model ini dibuat detail untuk memungkinkan simulasi beban dan tegangan yang tepat pada komponen lashing ketika kapal bergerak dan menghadapi beban dinamis dari muatan dan gelombang.

Tahap selanjutnya adalah uji konvergensi model komponen lashing, yaitu verifikasi bahwa hasil simulasi telah mencapai kestabilan numerik dan tidak berubah signifikan dengan penyesuaian mesh atau parameter analisis lain. Uji ini penting untuk memastikan validitas hasil simulasi dan menghindari kesalahan perhitungan akibat model numerik yang kurang akurat. Pada saat model dan uji konvergensi telah valid, dilakukan analisis beban pada lashing berdasarkan data dinamis dari simulasi gerakan kapal dan kondisi gelombang yang ditetapkan. Analisis beban ini mencakup identifikasi besarnya gaya tarik, tekan, dan geser yang dapat timbul pada sistem pengikatan akibat kombinasi gerak kapal dan muatan selama pelayaran.

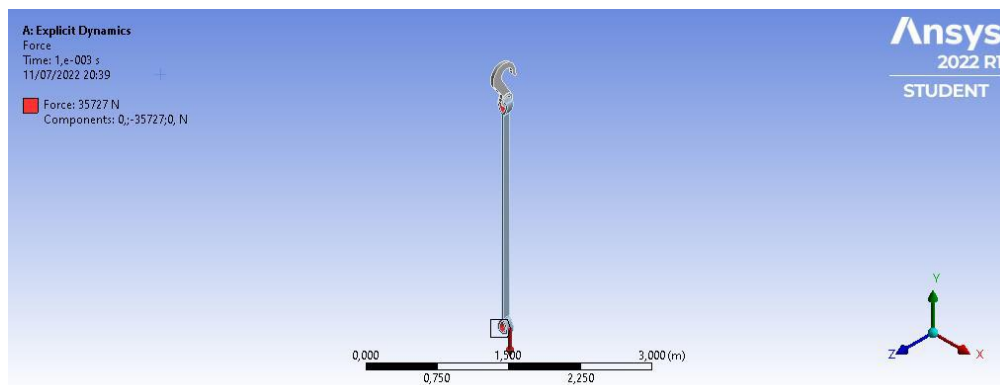
Pada tahap simulasi analisis tegangan lashing menggunakan perangkat lunak Ansys Explicit Dynamics, penentuan letak dan nilai beban menjadi elemen krusial guna merepresentasikan kondisi nyata pengikatan muatan kendaraan pada kapal Ro-Ro. Peletakan mobil dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi kendaraan standar yang umum digunakan, yaitu panjang 4,90 m dan lebar 2,90 m, sebagaimana terlihat pada gambar denah tampak depan, samping, dan atas kendaraan. Penempatan model mobil disusun sedemikian rupa sesuai standar peraturan PM 115 Tahun 2016, PM 39 Tahun 2016, dan PM 30 Tahun 2016 terkait jarak antar titik pengikatan (lashing points) yang meliputi jarak minimal antar titik pengikat longitudinal, transversal, dan jarak antar kendaraan.



Gambar 2 Skenario Lashing

Setiap simulasi memiliki nilai force (gaya) yang diterapkan pada tali lashing bagian dalam, berdasarkan kondisi sudut kemiringan kapal (oleng) yang bervariasi dari 0° (even keel) hingga 25° . Gaya-gaya ini merefleksikan beban statis dan dinamis yang diperoleh dari perhitungan beban total terdistribusi pada roda kendaraan sebagai akibat gerakan kapal dan gelombang laut. Penerapan gaya ini diinput secara detail pada bagian tali lashing dalam model Ansys, dengan visualisasi vector force pada tiap sisi tali untuk menunjukkan arah dan besar gaya yang bekerja.

Sedangkan untuk boundary condition (kondisi batas), model tali lashing dipasang dengan kondisi fixed support pada posisi anchor point (hook) yang mengikat bagian luar tali pada ban kendaraan. Kondisi ini memastikan bahwa tali lashing mengalami gaya tarik pada ujung dalam dan eksternal, sementara ujung luar terkunci secara kaku. Hal ini memungkinkan simulasi deformasi dan tegangan pada talinya dapat mencerminkan secara akurat stress concentration pada ujung tali, titik pengikatan, dan posisi terpanjang tali dalam kondisi kapal bergerak dan miring.



Gambar 3 Pengaturan Lashing

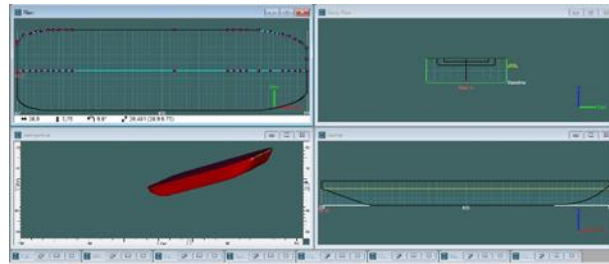
Penggabungan dari pengaturan peletakan mobil, input gaya berdasarkan kondisi kemiringan kapal, dan boundary condition yang realistis pada tali lashing memberikan kerangka simulasi yang komprehensif dan valid. Dengan ini, hasil simulasi tegangan maksimum yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar analisis kekuatan material lashing dan rekomendasi penempatan serta ukuran talinya dalam menghadapi beban dinamis saat pelayaran.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil dan Pembahasan Harus Dipisahkan dalam Dua Subbab yang Berbeda

Dalam tahap awal penelitian, pemahaman detail mengenai dimensi fisik kapal menjadi sangat penting sebagai dasar dari seluruh proses simulasi dan analisis yang akan dilakukan. Kapal Ro-Ro yang digunakan dalam studi ini memiliki dimensi utama sebagai berikut: Length Overall (LOA) sebesar 39,38 meter, Length Between Perpendiculars (LPP) 34,50 meter, Beam (B) atau lebar kapal 11 meter, Draft (T) atau kedalaman lambung kapal 2,3 meter, serta Height (H) atau tinggi lambung kapal mencapai 3,3 meter. Dimensi ini merupakan parameter utama yang menggambarkan bentuk dan proporsi kapal secara keseluruhan.

Pemodelan kapal dilakukan menggunakan software Maxsurf Modeler, yang memungkinkan pembuatan model tiga dimensi secara presisi dan komprehensif. Teknik pemodelan ini mengambil data-dasar geometris kapal untuk membentuk representasi digital yang akurat, sebagai fondasi untuk simulasi lanjut pada perilaku kapal di berbagai kondisi gelombang. Gambar 3.1 dalam jurnal memperlihatkan hasil pemodelan dengan sudut pandang yang lengkap, meliputi tampilan atas (plan view), samping (side view), dan potongan melintang (cross section), sehingga setiap aspek geometri kapal dapat dianalisis.



Gambar 4 Pemodelan kapal Ro-Ro

Model 3D kapal ini tidak hanya menggambarkan bentuk fisik, namun juga dimaksudkan untuk digunakan dalam analisis seakeeping, khususnya dalam mengevaluasi reaksi kapal terhadap gelombang dan kondisi laut yang simetris maupun acak. Akurasi pemodelan sangat vital karena kesalahan bentuk atau ukuran dapat berdampak signifikan pada hasil simulasi respons kapal, yang pada gilirannya memengaruhi penilaian beban dinamis seperti gaya dan tekanan pada sistem pengikatan muatan atau lashing. Pemodelan yang baik juga mendukung validasi terhadap data eksperimen atau hasil simulasi lain yang mungkin menjadi perbandingan.

3.2. Analisis *Response Amplitude Operator* (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) adalah parameter kunci dalam memahami bagaimana kapal merespons berbagai kondisi gelombang. RAO mendefinisikan rasio antara amplitudo respon gerak kapal dengan amplitudo gelombang yang datang, yang bergantung pada frekuensi gelombang dan arah datangnya. Studi ini mengestimasi RAO untuk kapal Ro-Ro pada kecepatan konstan 10 knot pada tiga arah datang gelombang utama: Following Sea (0°), Quarter Sea (45°), dan Beam Sea (90°). Analisis RAO dilakukan untuk tiga mode utama gerakan kapal: heave (gerak naik-turun vertikal), roll (gerak miring kiri-kanan), dan pitch (gerak ayunan mendatar pada bagian depan dan belakang kapal). Dari hasil Tabel 3.1, diperoleh insight penting bahwa gerakan heave dan roll memiliki nilai RAO maksimum pada arah gelombang Beam Sea (90°), dengan nilai roll mencapai puncak paling tinggi yaitu 6,685 rad/rad pada frekuensi encounter 1,192 rad/s. Hal ini menunjukkan bahwa kapal sangat rentan mengalami gerak miring yang signifikan ketika gelombang datang dari samping.

Tabel 1 Hasil analisis RAO

Moda Gerakan	Kecepatan (Knot)	RAO Maksimum	Encounter Frequency (rad/s)
		0 deg (Following Sea)	
Heave (m/m)	10	0,998	0,179
Roll (rad/rad)		0	0,476
Pitch (rad/rad)		1,265	0,404
Moda Gerakan	Kecepatan (Knot)	RAO Maksimum	Encounter Frequency (rad/s)
		45 deg (Quarter Sea)	
Heave (m/m)	10	0,996	0,185
Roll (rad/rad)		1,025	0,674
Pitch (rad/rad)		1,042	0,54
Moda Gerakan	Kecepatan (Knot)	RAO Maksimum	Encounter Frequency (rad/s)
		90 deg (Beam Sea)	
Heave (m/m)	10	1,16	1,547
Roll (rad/rad)		6,685	1,192
Pitch (rad/rad)		0,694	0,996

Sebaliknya, gerakan pitch menunjukkan RAO maksimum pada arah gelombang Following Sea (0°) sebesar 1,265 rad/rad pada frekuensi yang lebih rendah yaitu 0,404 rad/s. Ini mencerminkan bahwa ayunan kapal pada arah longitudinal lebih dominan saat gelombang datang dari belakang atau depan kapal. Arah Quarter Sea (45°) menunjukkan kecenderungan RAO yang lebih rendah dan tidak terdapat nilai maksimum yang signifikan pada ketiga jenis gerakan, mengindikasikan kondisi gelombang pada sudut ini menghasilkan respons kapal yang relatif sedang. Analisis RAO ini juga membantu dalam mengidentifikasi kondisi operasi kapal yang paling kritis, dimana gerakan kapal menyebabkan stres terbesar pada muatan atau struktur kapal, sehingga dapat menjadi dasar rekomendasi operasional dan perawatan.

3.3. Analisis Respon Spektral pada Gelombang Acak

Studi tidak hanya berhenti pada gelombang homogen dan arah datang gelombang yang tetap, melainkan juga menilai respon kapal terhadap gelombang acak yang lebih mencerminkan kondisi laut riil. Gelombang acak dipahami sebagai variasi gelombang dengan spektrum frekuensi dan amplitudo yang berbeda-beda, yang memerlukan analisis respon spektral (spectral response analysis) untuk mengukur energi dinamis yang dialami kapal.

Analisis ini dilakukan dengan mengalikan kuadrat nilai RAO dengan spektrum gelombang pada tiga variasi arah gelombang: Following Sea (0°), Quarter Sea (45°), dan Beam Sea (90°). Pada penelitian ini juga digunakan tiga variasi tinggi gelombang signifikan (H_s), yaitu 1,5 meter, 5 meter, dan 8 meter, dengan kecepatan kapal konstan 10 knot, untuk memahami bagaimana variabel tinggi gelombang mempengaruhi besaran respon energi gerak kapal. Tabel 3.2 menunjukkan resume analisis spektral untuk ketiga jenis gerakan (roll, pitch, heave) dan berbagai kondisi H_s . Hasilnya menunjukkan bahwa energi respons tertinggi pada gerakan roll terdapat saat gelombang datang dari arah Beam Sea, dengan nilai yang secara proporsional meningkat bersama dengan peningkatan tinggi gelombang. Nilai roll ini sangat signifikan dibandingkan dengan pitch dan heave yang menunjukkan nilai lebih rendah, mengkonfirmasi bahwa gelombang datang dari samping menyebabkan pergerakan miring yang paling berat. Untuk pitch, energi respon memuncak pada arah Following Sea, sesuai dengan hasil RAO sebelumnya, tetapi secara umum nilainya lebih kecil dibandingkan roll. Mode heave juga menunjukkan kenaikan energi respons, khususnya pada tinggi gelombang yang lebih besar, namun secara keseluruhan masih berada di bawah pengaruh roll dalam hal besaran respon energi.

Analisis spektral ini penting dalam menilai risiko kegagalan sistem pengikatan muatan, karena energi kinetik yang bekerja pada muatan dan struktur kapal tergantung pada variasi gelombang secara acak. Dengan menggunakan nilai energi respon spektral, dapat dilakukan perhitungan beban dinamis aktual yang lebih realistis dibandingkan sekadar menggunakan nilai respon dari gelombang sinusoida tunggal.

3.4. Analisis Tegangan Maksimum Lashing

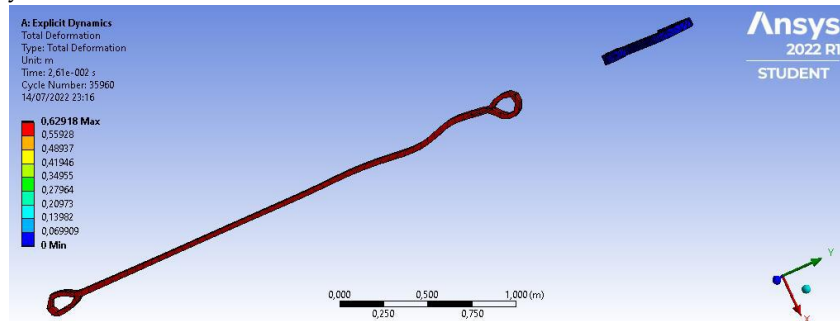
Analisis tegangan maksimum pada lashing merupakan tahap krusial dalam memastikan keamanan muatan pada kapal Ro-Ro, terutama terhadap keadaan gelombang laut yang menyebabkan kemiringan atau oleng kapal. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Workbench pada kondisi variasi sudut oleng kapal, mulai dari *even keel* (0°) hingga sudut ekstrem 25° . Hasil simulasi ini memberikan gambaran mendalam mengenai distribusi tegangan, potensi titik lemah pada tali lashing, serta batas operasional aman yang harus diperhatikan.

Tabel 2 Hasil analisis spektral

Roll				Pitch				Heave			Arah Datang Gelombang
H_s (m)	m_0 (deg ²)	σ (deg)	s (deg)	H_s (m)	m_0 (deg ²)	σ (deg)	s (deg)	H_s (m)	m_0 (m ²)	z_s (m/s ²)	
1,5	0	0	0	1,5	1,74	1,65	2,64	1,5	0,079	0,106	FOLLOWING SEA
5	0	0	0	5	19,39	5,506	8,81	5	0,883	0,355	
8	0	0	0	8	49,59	8,8	14,08	8	2,262	0,568	
1,5	5,17	2,844	4,55	1,5	1,44	1,5	2,4	1,5	0,091	0,154	QUARTER SEA
5	57,49	9,481	15,17	5	15,96	4,994	7,99	5	1,012	0,513	
8	146,9	15,15	24,24	8	40,83	7,988	12,78	8	2,591	0,821	
1,5	22,11	5,881	9,41	1,5	0,62	0,981	1,57	1,5	0,116	0,468	BEAM SEA
5	245,7	19,59	31,35	5	6,86	3,275	5,24	5	1,294	1,559	
8	628,3	31,33	50,13	8	17,55	5,238	8,38	8	3,312	2,493	

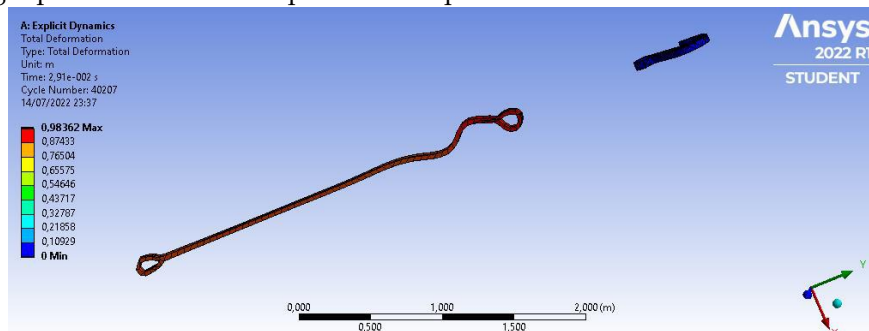
Pada kondisi dasar *even keel*, di mana kapal berada dalam posisi horizontal tanpa kemiringan, analisis menunjukkan tegangan terbesar pada ujung tali bagian dalam dengan nilai maksimal sebesar 8,097 MPa. Tegangan ini jauh berada di bawah tegangan ijin material yaitu 32,8 MPa, menandakan bahwa pengikatan muatan dengan lashing dalam kondisi kapal berada pada trim nol berada dalam keadaan aman secara struktural.

Deformasi tali mencapai penambahan panjang sebesar 0,62918 m dari panjang awal 3 m, yang mengindikasikan adanya regangan akibat beban statis. Hasil ini menjadi barometer awal bahwa meskipun kapal belum mengalami oleng, lashing sudah mengalami gaya dan regangan tertentu yang perlu diperhitungkan dalam desain dan pemilihan bahan talinya.



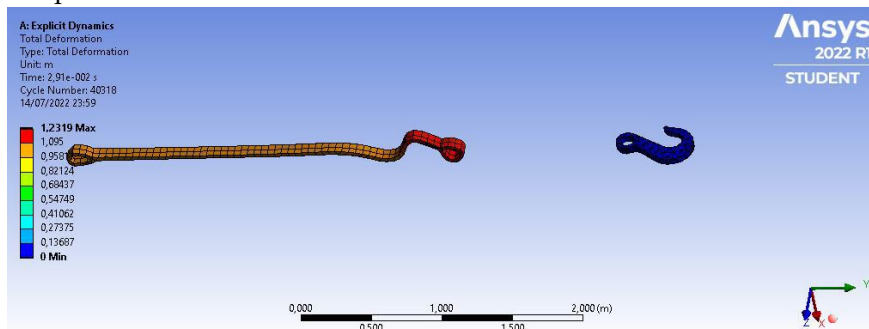
Gambar 5 Sudut 0 derajat

Ketika kapal mulai oleng pada sudut kecil 5°, gaya lashing meningkat menjadi 19.854,61 N sehingga tegangan naik ke 11,165 MPa. Meskipun masih di bawah batas ijin, kenaikan ini menunjukkan hubungan non-linear antara sudut oleng dan tegangan yang diterima tali. Deformasi bertambah menjadi 0,98362 m, menandakan peningkatan beban mekanis yang diperlukan untuk mempertahankan posisi muatan.



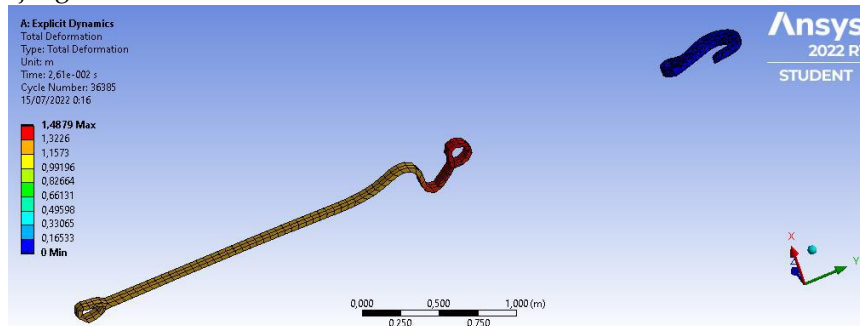
Gambar 6 Sudut 5 derajat

Pada sudut oleng 10°, posisi tegangan maksimum bergeser menjadi bagian luar tali yang melilit pada ban serta ujung bagian dalam yang menyatu pada *hook*. Tegangan melambung menjadi 15,23 MPa dengan gaya sebesar 23.792,95 N, dan deformasi meningkat ke 1,2319 m. Pergeseran titik tegangan maksimum ini menandakan adanya redistribusi beban akibat perubahan posisi dan geometri tali saat kapal miring, sehingga penting untuk mendesain tali dan titik ikat agar dapat menahan stress konsentrasi tersebut.



Gambar 7 Sudut 10 derajat

Ketika kapal oleng 15°, peningkatan signifikan terjadi di mana tegangan mencapai 25,345 MPa dan gaya 34.389,20 N, meskipun masih dalam batas aman. Namun, deformasi tali meningkat lebih besar yaitu 1,4879 m, menandakan adanya potensi masalah elastisitas atau permanen jika beban semacam ini sering terjadi. Kondisi ini menuntut material dan desain sistem lashing yang tahan pada kondisi elastisitas tinggi untuk menghindari kerusakan jangka panjang.



Gambar 8 Sudut 15 derajat

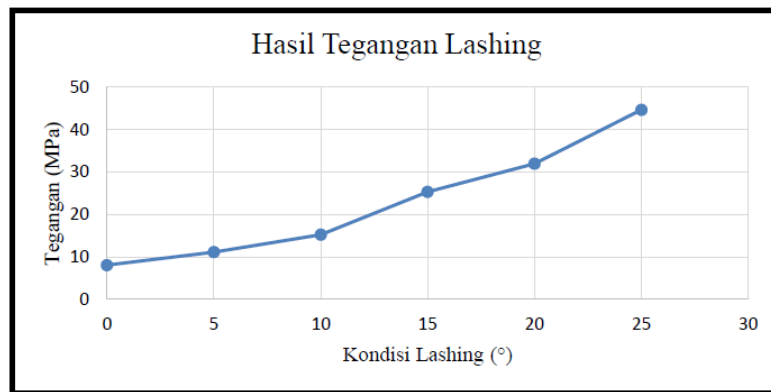
Hasil ini menjadi dasar yang kuat untuk kebijakan keselamatan pengikatan muatan di kapal Ro-Ro. Pengikatan muatan harus didesain dengan memperhatikan batas aman tegangan tali dan deformasi, serta harus diuji ketahanannya pada kondisi oleng sampai minimal 20°. Kelalaian dalam mengantisipasi tegangan melebihi batas dapat menyebabkan kerusakan tali lashing dan potensi kecelakaan muatan.

Rekomendasi penting termasuk penggunaan material tali dengan tegangan ijin di atas beban maksimum diperkirakan, terutama untuk menahan beban dinamis pada sudut kemiringan yang lebih ekstrim. Selain itu, desain pengikatan harus dilakukan untuk meminimalisir konsentrasi tegangan di satu titik, misalnya dengan penggunaan bantalan pelindung dan pengaturan lintasan tali agar tidak bergesekan langsung dengan bagian tajam dari ban kendaraan.

Tabel 3 Hasil tegangan lashing

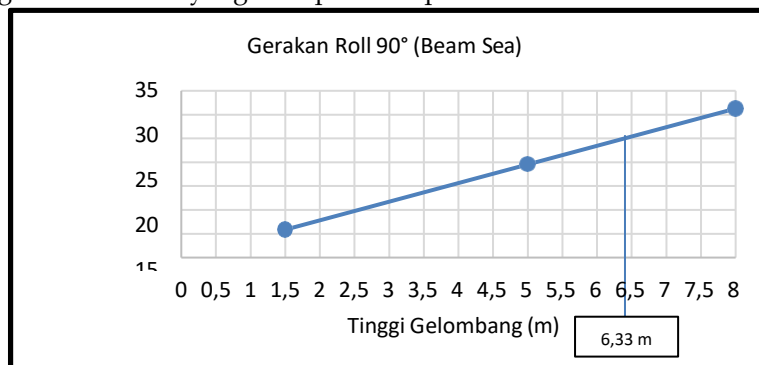
No.	Kondisi	Force Lashing (N)	Tegangan Lashing (MPa)	Keterangan
1	0°	5202,3349	2,1949	Memenuhi
2	5°	12001,97723	5,4935	Memenuhi
3	10°	13971,1427	6,6704	Memenuhi
4	15°	16502,65303	7,9916	Memenuhi
5	20°	19938,41244	10,753	Memenuhi
6	25°	24961,15671	15,658	Tidak Memenuhi

Simulasi dan perhitungan tegangan maksimum juga harus menjadi prosedur standar dalam perencanaan muatan dan pengikatan di kapal, di samping pertimbangan probabilitas tinggi gelombang laut yang bisa menyebabkan sudut oleng berbahaya. Data probabilitas dan risiko gelombang tinggi dari tabel analisis juga harus dikontrol secara berkala untuk menentukan risiko operasional yang sesungguhnya.



Gambar 9 Grafik tegangan lashing

Sebagaimana tergambar pada grafik hasil analisis tegangan lashing, terdapat kecenderungan peningkatan tegangan yang signifikan seiring dengan bertambahnya sudut oleng kapal. Peningkatan ini mencapai puncaknya pada sudut 25°, di mana tegangan yang dihasilkan telah melampaui batas ijin material lashing, sehingga berpotensi menyebabkan kegagalan mekanis. Selain itu, data tinggi gelombang maksimum pada kondisi oleng 20°, yang tercatat mencapai 5,14 meter dengan mode roll 90° (Beam Sea), semakin menegaskan pentingnya pengendalian serta perancangan sistem pengikatan muatan yang mampu merespons kondisi dinamis semacam ini.



Gambar 10 Oleng maksimum

Hasil ini menunjukkan bahwa keamanan muatan sangat dipengaruhi oleh kondisi gelombang dan kemiringan kapal, sehingga pengikatan lashing tidak hanya harus kuat secara material, tetapi juga harus mampu beradaptasi terhadap beban dinamis yang terjadi selama pelayaran. Oleh karena itu, penegasan kembali tentang batas aman sudut oleng dan kekuatan material lashing menjadi sangat esensial dalam praktik operasional kapal Ro-Ro, guna menghindari risiko kerusakan muatan maupun kerusakan kapal yang dapat berujung pada kecelakaan. Penelitian ini sekaligus menyoroti perlunya pengawasan ketat berkala serta pengembangan desain sistem lashing yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrim sebagai langkah mitigasi risiko di masa depan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis secara komprehensif kekuatan sistem pengikatan muatan (lashing) pada kapal Ro-Ro dengan pendekatan gabungan pemodelan kapal, simulasi gerakan kapal terhadap gelombang laut, serta analisis tegangan maksimum pada tali lashing menggunakan metode elemen hingga di Ansys Explicit Dynamics. Dari hasil pemodelan kapal dengan dimensi LOA 39,38 m, LPP 34,5 m, dan B 11 m, ditemukan bahwa respons gelombang terbesar pada gerakan roll 90° (Beam Sea) memberikan tinggi gelombang maksimum sebesar 6,33 m pada kondisi oleng 25°.

Simulasi tegangan lashing menunjukkan adanya peningkatan tegangan tali secara signifikan seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan kapal. Tegangan lashing terkecil sebesar 2,1949 MPa terjadi pada kondisi even keel (0°) dengan beban 5.202,33 N, dan meningkat bertahap hingga mencapai 15,658 MPa dengan beban 24.961,16 N pada sudut oleng 25°, di mana pada sudut tersebut tegangan telah melewati batas

ijin material sebesar 32,8 MPa sehingga tali lashing tidak lagi memenuhi batas keamanan dan berpotensi putus. Hasil ini menguatkan bahwa tali lashing hanya aman untuk digunakan pada sudut kemiringan kapal maksimal 20°, dengan tegangan sebesar 10,753 MPa pada beban 19.938,41 N yang masih memenuhi standar kekuatan material.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik yang perlu dilaporkan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditempatkan pada bagian akhir artikel setelah kesimpulan dan sebelum catatan serta daftar pustaka.

Pernyataan Penggunaan AI dalam Penulisan

Selama penyusunan karya ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk memeriksa kepaduan kalimat yang diterjemahkan dan Grammarly untuk meninjau keakuratan tata bahasa. Setelah menggunakan alat/layanan ini, penulis meninjau dan mengedit konten sesuai kebutuhan dan bertanggung jawab penuh atas isi publikasi tersebut.

Daftar Pustaka

- Aziz, A. (2019). Teknik pelashingan muatan kontainer on deck pada kapal MV. Oriental Ruby untuk penganggungan pergeseran muatan. *Jurnal Dinamika Bahari*, 10(1), Oktober 2019.
- Bhattacharya, R. (1978). *Dynamics of marine vehicles*. New York: United States of America.
- Kristanto, A., dkk. (2018). Penilaian risiko bongkar muat kapal cargo PT. Multiguna Shipping Lines di Pelabuhan Umum Gresik. *Jurnal Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri*, ISSN 2085-4218.
- Laut, Dirjen Perhubungan. (2012). Pemberlakuan standar dan petunjuk teknis pelaksanaan kapal non konvensi berbendera Indonesia. SK Dirjen Perhubungan Laut No. Um. 008/9/20/DJPL-12.
- Ma'ruf, A. (2020). Analisa seakeeping kapal pembersih sampah (Trash Skimmer) di wilayah perairan Teluk Sumenep. *Jurnal Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan*, ISSN 2686-0651.
- Perhubungan, Menteri. (2009). Standar kapal non konvensi berbendera Indonesia. Peraturan Menteri Perhubungan KM. 65/2009.
- Perhubungan, Menteri. (2016a). Garis muat kapal dan pemuatan. Peraturan Menteri Perhubungan PM.39/2016.
- Perhubungan, Menteri. (2016b). Kewajiban pengikatan kendaraan pada kapal angkutan penyeberangan. Peraturan Menteri Perhubungan PM.30/2016.
- Perhubungan, Menteri. (2016c). Tata cara pengangkutan kendaraan diatas kapal. Peraturan Menteri Perhubungan PM.115/2016.
- Putra, D. P., dkk. (2016). Analisa seakeeping dan prediksi motion sickness incidence (MSI) pada kapal perintis 500 DWT dalam tahap desain awal (initial design). *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(3), Juli 2016.
- Rifqy, M. (2018). Analisis kekuatan lashing kontainer sebagai penunjang keselamatan kapal peti kemas dengan metode elemen hingga. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Romadhoni. (2019). Analisa seakeeping performance kapal cepat model planing hull chine. *Jurnal Inovtek Polbeng*, 9(1), ISSN 2088-6225.

- Satria, B., dkk. (2012). Aplikasi formal safety assessment untuk penilaian risiko kecelakaan pada helipad FSO: Studi kasus FSO Kakap Tuna. Jurnal Teknik ITS, 1, ISSN 2301-9271.
- AS/NZS 4360. (2004). 3rd Edition The Australian and New Zealand Standard on Risk Management. Broadleaf Capital International Pty Ltd, NSW, Australia.