



FORENSIC STRUCTURAL ASSESSMENT OF MAHAKAM BRIDGE AFTER BARGE COLLISION: DAMAGE EVALUATION AND ANALYSIS

Oleh

Tukimun¹, Aco Wahyudi Efendi², Andi Muhammad Ade Satriya³

^{1,3}Fakultas Teknik, Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda, Indonesia

²Department of Civil Engineering, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

Email: ¹moonix.mgt@gmail.com, ²acowahyudiefendi@student.uns.ac.id

Abstract

In an attempt to maintain safety and functionality, bridge structures—which are essential parts of transportation infrastructure—must be resilient to unintentional events like vessel collisions. After colliding with the IS-28 ship on February 16, 2025, the Mahakam Bridge in Samarinda, Indonesia, suffered significant structural damage, especially at Pier 3. In order to evaluate the extent of the damage and the structural integrity, this study presents a forensic examination of the occurrence that combined visual inspection, dimensional measurements, and Finite Element Method (FEM) analysis. Important discoveries included spalling and exposed reinforcement bars, as well as considerable cracking in the downstream pile top with thicknesses of up to 1.3 mm and lengths of up to 4.57 meters. Furthermore, expansion joint misalignments were found, as evidenced by the left span's gradual elongation over seven years, from 4.3 cm to 5.2 cm. Critical stress concentrations were found via FEM calculations, with compressive stresses exceeding the material limit of 9,000 kN/m² and tensile stresses reaching 75 MPa. Furthermore, differences between 3D scanning and video-based evaluations brought to light the importance of precise measuring methods in structural analysis. To increase the bridge's resistance against future crashes, the study emphasizes the necessity of impact-resistant designs, targeted retrofitting techniques, and ongoing structural monitoring. This study fills a significant knowledge gap in regional forensic engineering and offers useful information for risk reduction and bridge restoration in maritime settings.

Keywords: *Assessment, Bridge, Collision, FEA, LISA, Mahakam*

PENDAHULUAN

Jembatan adalah komponen penting dari jaringan transportasi karena menjamin konektivitas dan mendorong aktivitas ekonomi. Kekuatan struktur jembatan sangat penting untuk kelancaran transportasi dan keselamatan publik. Namun, tabrakan yang tidak disengaja—seperti tabrakan kapal—memberikan ancaman serius pada struktur jembatan, yang berpotensi menyebabkan kerusakan parah, mengganggu operasi, dan membutuhkan perbaikan yang mahal (Li, Wang and Zhou, 2021). Kerentanan jembatan terhadap insiden semacam itu telah dipelajari secara luas, yang menyoroti perlunya

desain struktural yang kuat dan strategi mitigasi yang efektif untuk menahan beban yang tidak disengaja (Ye, Jiang and Wang, 2017; Jihong and Liqiang, 2018; Zhang, Xu and Li, 2020).

Tongkang IS-28 merusak Jembatan Mahakam di Samarinda, Indonesia, pada 16 Februari 2025. Keamanan dan kemampuan servis jembatan dipertanyakan karena deformasi struktural yang disebabkan oleh tabrakan ini, yang terutama berdampak pada Dermaga 3. Dampak bencana dari tabrakan kapal-jembatan telah diilustrasikan oleh kecelakaan serupa, seperti bencana Jembatan

Eitai di Jepang dan runtuhnya Jembatan Tampa Bay Sunshine Skyway pada tahun 1980 (Sabuwala, Linzell and Krauthammer, 2005; Costas, 2013; Shegay et al., 2018; Wang, Chen and Liu, 2019; Efendi and Weijia, 2023a). Dampak kapal terhadap konstruksi jembatan telah menjadi subyek dari berbagai penelitian. Desain struktur yang tahan benturan dikemukakan, dan dinamika tabrakan kapal-jembatan diperiksa (Sha and Hao, 2016). Demikian pula, meneliti reaksi struktural terhadap tabrakan kapal yang tidak disengaja dan menawarkan metode pemodelan numerik untuk menentukan kerusakan (Saiidi, O'Brien and ..., 2009; Cui, Liu and Zhang, 2022). Namun, alih-alih studi kasus forensik dari dunia nyata, sebagian besar penelitian saat ini berfokus pada simulasi teoretis. Kesenjangan penelitian yang menonjol adalah kurangnya penelitian tentang kerusakan jembatan terkait tabrakan tongkang di Indonesia, khususnya yang berkaitan dengan Jembatan Mahakam (Efendi, 2022d; Aco Wahyudi Efendi, 2025).



Gambar 1. Tabrakan jembatan yang terjadi

METODE PENELITIAN

Penelitian sebelumnya telah dilakukan, namun analisis forensik menyeluruh yang mengevaluasi tingkat kerusakan dan memberikan strategi restorasi yang dapat diterapkan pada Jembatan Mahakam masih kurang. Kebutuhan akan studi ini disoroti oleh kurangnya studi kasus menyeluruh tentang tabrakan kapal-jembatan di daerah tersebut. Dalam rangka memulihkan fungsi jembatan, studi ini mencoba untuk menilai tingkat kerusakan struktural, menentukan faktor risiko penting, dan menyarankan teknik rehabilitasi yang tepat. Dengan mengisi kekosongan pengetahuan ini, penelitian ini memajukan taktik ketahanan untuk jembatan yang rentan terhadap tubrukan kapal dan memajukan disiplin forensik struktural.



Gambar 2. Tata Letak Jembatan

Jembatan ini menghubungkan dua kota besar di Kalimantan Timur, yaitu Balikpapan dan Samarinda, yang merupakan akses distribusi utama untuk Kalimantan Timur, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 3. Tampilan Jembatan

Penilaian kerusakan Jembatan Mahakam dilakukan dengan menggunakan pendekatan yang terstruktur dan sistematis untuk memastikan evaluasi yang komprehensif



dan keandalan hasil. Metode yang dipilih sesuai dengan standar teknik dan kerangka kerja penilaian struktural yang telah ditetapkan.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus untuk menganalisa kerusakan struktur pada Jembatan Mahakam. Pengumpulan dan analisis data dilakukan dengan menggunakan kombinasi inspeksi visual, pengukuran teknik, dan pemodelan komputasi. Pemilihan metode ini didasarkan pada penelitian sebelumnya mengenai penilaian kerusakan jembatan (Wang et al., 2020).

Metode Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui beberapa pendekatan untuk memastikan akurasi dan ketelitian:

Inspeksi Visual

Pemeriksaan visual yang komprehensif terhadap elemen struktur dilakukan, dengan fokus pada pendeteksian anomali permukaan seperti retakan beton, deformasi baja, dan pergeseran sambungan muai (expansion joint). Pencitraan drone beresolusi tinggi digunakan untuk mendokumentasikan area yang tidak dapat diakses untuk penilaian lebih lanjut. Metode ini mengikuti pedoman standar yang diberikan oleh AASHTO untuk inspeksi jembatan (Dorafshan and Maguire, 2018; Tarawneh, Bodour and Masada, 2018; Khalafalla and Ali, 2020; Tarawneh et al., 2020).

Analisis Pengukuran

Analisis kuantitatif terhadap kerusakan yang diamati dilakukan, termasuk pengukuran lebar retak, keretakan dermaga, dan ketidaksejajaran sambungan. Teknik Digital Image Correlation (DIC) digunakan untuk menilai pola perpindahan dan deformasi secara akurat. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang tepat terhadap regangan material dan titik kegagalan (Ikard and Pease, 2018; Kamshilin and Kaznacheev, 2018; Venglár, Sokol and Ároch, 2018; Vialis et al., 2018; Chen et al.,

2019; Dráb et al., 2019; Nguyen et al., 2021; Niu et al., 2021).

Kerusakan yang diamati dibandingkan dengan batas yang dapat diterima yang ditentukan dalam kode desain jembatan, seperti Spesifikasi Umum Rehabilitasi Jembatan 2018. Selain itu, panduan dari Asosiasi Pejabat Jalan Raya dan Transportasi Negara Bagian Amerika dan Komite Standarisasi Eropa juga dirujuk untuk memastikan kepatuhan terhadap tolok ukur integritas struktural internasional (Brown, 2013).

Metode Analisis Data

Untuk menganalisis data yang terkumpul, berbagai teknik penilaian rekayasa digunakan:

Penilaian Integritas Struktural

Kapasitas penahan beban dan titik-titik kegagalan potensial jembatan dievaluasi berdasarkan kerusakan yang tercatat. Teknik pemodelan komputasi digunakan untuk mensimulasikan distribusi tegangan dan memprediksi kerentanan struktural (Li, Wang and Zhou, 2021). Analisis elemen hingga (FEA) diimplementasikan untuk mensimulasikan skenario kegagalan potensial

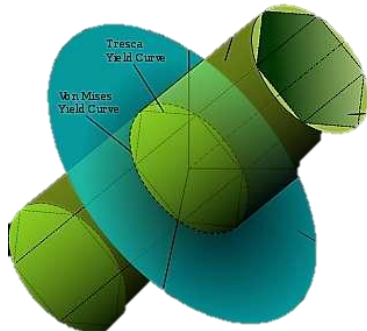
Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (FEM) adalah teknik numerik yang digunakan untuk menganalisis berbagai masalah teknis dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen diskrit dan menyusun sistem persamaan linier atau nonlinier dalam jumlah besar, sering kali melebihi 20.000 persamaan, sehingga membutuhkan dukungan komputer yang memadai. Metode ini digunakan untuk memahami distribusi deformasi akibat pengaruh gaya, tekanan, suhu, dan aliran pada suatu benda, dengan fokus pada pencarian perpindahan di titik simpul, sambungan, dan gaya dalam struktur. Hasil perhitungannya sebanding dengan metode analisis struktur klasik dan dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan elemen kontinum berdimensi satu, dua, atau tiga untuk mendapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi nyata (Efendi,

2022b; 2022c; 2022a; EFENDI, 2022; Efendi, Do and Rachman, 2022; Efendi, 2023c; 2023d; 2023g; 2023e; 2023a; 2023b; 2023f; Efendi and Weijia, 2023a; 2023b; EFENDI, 2024; Efendi, 2024c; 2024b; 2024a; n.d.; Efendi and Safitri, 2024)

Tegangan Von Mises

Dalam ilmu material dan teknik hasil, kriteria Von Mises juga dapat diterapkan dalam bentuk tegangan Von Mises atau tegangan tarik yang setara σ_v , nilai tegangan skalar yang dapat dihitung dari tegangan tensor s . Dalam metode ini, material dikatakan mulai menghasilkan setelah diperkirakan tegangan Von Mises mencapai nilai kritis yang disebut kekuatan luluh S_y . Tegangan Von Mises digunakan untuk memprediksi menghasilkan bahan di bawah kondisi Tegangan Von Mises memenuhi properti yang menunjukkan bahwa dua tegangan dengan energi distorsi sama-sama memilikinya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Kriteria Tegangan menurut Von Mises-Tresca

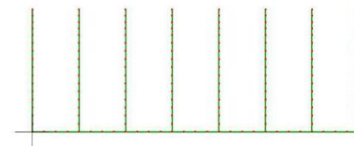
Menurut Von Mises, kriteria hasil tidak tergantung pada komponen hidrostatik dari tegangan pertama invarian. Ini berlaku untuk analisis deformasi plastik untuk bahan yang ulet seperti logam, karena hasilnya tidak tergantung pada komponen hidrostatik dari tegangan pertama invarian (Efendi, 2023f)

Perangkat Lunak

LISA FEA V.8

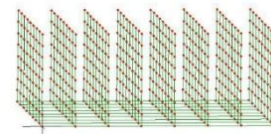
Untuk memperkirakan kenaikan suhu untuk tiga model penukar panas yang berbeda,

program analisis elemen LISA digunakan. Tiga jenis model yang paling sederhana dan mudah dibangun adalah model elemen garis, cangkang, dan padat. Untuk model elemen garis, pengguna hanya perlu menambahkan dimensi elemen di satu kotak dialog dan konduktivitas termal di kotak dialog lain. LISA menyediakan menu bentuk elemen dan geometri struktur yang sering digunakan. Garis model di jendela pra-pemrosesan LISA setelah meshing ditunjukkan pada Gambar 5. Permodelan garis ini sederhana dan mudah karena keterbatasan jumlah node yang disediakan, yang membuat pemrosesan analisis lebih mudah.



Gambar 5. Permodelan elemen geometri dengan metode garis (Couch, 2013)

Seperti yang ditunjukkan di atas, peneliti dapat memilih untuk memberi kode warna pada pelat dasar dan sirip model. Ini adalah keputusan yang dibuat oleh peneliti saat memilih dan menggunakan elemen permodelan. Model berikutnya, struktur pelat, dipilih untuk meminimalkan proses analisis FEM karena jumlah node dan kemampuan perangkat lunak komputer.gambar 6.



Gambar 6. Permodelan elemen geometri dengan metode pelat (Couch, 2013)

Metode Analisis

Perhitungan analisis numerikal untuk mengevaluasi perilaku yang terjadi pada Pier 3 Jembatan Mahakam terhadap beban yang diberikan, dan mendapatkan hasil tegangan yang terjadi pada struktur Pier 3 Jembatan Mahakam dan juga perilaku stabilitas yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Komputasi dan Distribusi Beban

Setelah kejadian tumbukan, redistribusi tegangan yang cukup besar ditemukan dengan menggunakan analisis Metode Elemen Hingga (FEM). Konsentrasi tegangan pada permukaan dermaga diungkap melalui mekanisme transfer beban; tegangan tarik maksimum, yang melebihi kekuatan luluh material, diukur sebesar 75 Mpa. Hasil ini menekankan bahwa untuk meningkatkan stabilitas dan umur kinerja, teknik redistribusi beban yang melibatkan perkuatan dan perkuatan struktural harus diimplementasikan (Deng et al., 2019).

Kerusakan Komponen Beton

Elemen beton pada jembatan mengalami kerusakan struktural yang parah akibat kejadian tabrakan. Pile cap dermaga pada sisi hilir memiliki lebar retak 1,2-1,3 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar 7, lebih besar dari ambang batas yang direkomendasikan untuk kinerja jembatan yang aman.



(a)



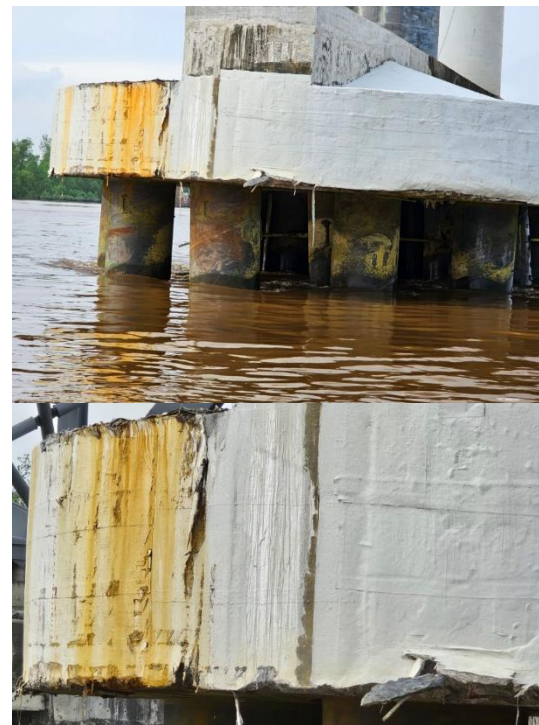
(b)



(c)

Gambar 7. (a) Lokasi retakan setelah tubrukan kapal (b) lebar retakan 1,3 mm (c) lebar retakan 1,2 mm

Lebih lanjut, retakan pada dermaga menunjukkan adanya tekanan struktural yang signifikan dan kemungkinan bahaya kegagalan, memanjang hingga 4,57 meter dengan lebar yang bervariasi antara 0,4 dan 0,7 meter, seperti ditunjukkan pada gambar 5. Selain itu, spalling beton juga ditemukan, mengekspos tulangan dan meningkatkan risiko korosi dan kerusakan material dalam jangka panjang (Kong et al., 2018; Wang et al., 2019).



Gambar 8. Elemen pilecap dermaga 3 yang pecah akibat benturan



Perpindahan Sambungan *Ekspansi Joint*

Setelah tumbukan tersebut, ditemukan adanya perpindahan pada sambungan *Ekspansi Joint*. Ketidaksejajaran yang cukup besar yang mengindikasikan adanya pengaruh getaran yang besar pada superstruktur jembatan ditunjukkan oleh perpindahan yang teramati, yang meningkat dari 4,3 cm menjadi 5,2 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Ketidaksejajaran ini sangat penting karena dapat melemahkan struktur dan mempercepat keausan. Untuk mengevaluasi tren perpindahan jangka panjang dan menghentikan lebih banyak kerusakan, ditekankan bahwa perilaku sambungan harus terus dipantau (Deng et al., 2019; Zhang, Xu and Li, 2020; Cui, Liu and Zhang, 2022).

Setelah terjadi dampak pada struktur jembatan, inspeksi berkala telah dilakukan untuk memantau perpanjangan sambungan ekspansi. Data yang direkam selama bertahun-tahun memberikan wawasan tentang perilaku struktural dan potensi efek jangka panjang.

Pengukuran awal pada April 2018 menunjukkan perpanjangan sambungan ekspansi sebesar 3 cm di sisi kanan dan 4 cm di sisi kiri, dengan perubahan kecil yang mengindikasikan fase penyesuaian awal pascatumbukan. Selama periode 2019–2022, terjadi penyusutan bertahap di kedua sisi, mencerminkan proses stabilisasi atau efek dari faktor eksternal seperti suhu, pengendapan struktur, dan pemeliharaan. Namun, tren ini berbalik pada Desember 2022, dengan peningkatan panjang sambungan di kedua sisi, kemungkinan akibat kelelahan material atau beban lalu lintas. Pengukuran terbaru pada Februari 2025 menunjukkan perpanjangan signifikan hingga 5,2 cm di sisi kiri, yang menandakan regangan struktural progresif akibat tegangan kumulatif, pengaruh lingkungan, atau dampak lanjutan dari tumbukan sebelumnya. Berikut adalah rasio perpanjangan sambungan muai dari tahun ke tahun untuk kedua sisi jembatan, Pada tanggal

28 April 2018, nilai pada sisi kanan tercatat sebesar 0,67 (mengalami penurunan 33%), sedangkan sisi kiri sebesar 1,05 (peningkatan 5%). Pada 30 Juni 2019, nilai sisi kanan meningkat menjadi 0,95 (penurunan hanya 5%), sementara sisi kiri menjadi 0,95 (penurunan 4,8%). Selanjutnya, pada 19 November 2019, nilai sisi kanan turun kembali menjadi 0,74 (penurunan 26,3%) dan sisi kiri menjadi 0,85 (penurunan 15%). Namun, pada 22 Desember 2022 terjadi kenaikan signifikan, dengan sisi kanan mencapai 1,29 (kenaikan 28,6%) dan sisi kiri 1,26 (kenaikan 26,5%). Terakhir, pada 18 Februari 2025, nilai sisi kanan sedikit menurun menjadi 1,11 (peningkatan 11,1% dari sebelumnya), dan sisi kiri menjadi 1,21 (peningkatan 20,9%). Hal ini menunjukkan bahwa setelah kontraksi awal, sambungan ekspansi mulai meningkat lagi, terutama di sisi kiri, yang menunjukkan regangan struktural yang progresif.

Deformasi Struktural

Kerusakan gesekan pada tulangan baja jembatan mengakibatkan robekan memanjang hingga 5 meter pada lapisan fiber-reinforced polymer (FRP). Kekhawatiran tentang paparan korosi dan kemungkinan kegagalan fatik seiring waktu muncul akibat degradasi ini (Kim and Lee, 2018). Luluh lokal lebih lanjut divalidasi dengan analisis komputasi, yang menyoroti perlunya lapisan pelindung dan penguat untuk menjaga integritas struktur baja (Yuan et al., 2018).



Gambar 9. Pergerakan yang terjadi akibat tabrakan kapal berdasarkan video CCTV

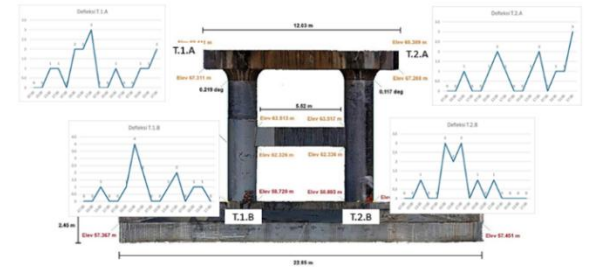
Dimensi pile cap di Dermaga 3 pertama kali dihitung 142,52 meter dengan menggunakan analisis video dan data deformasi yang diperoleh setelah bencana. Namun, pengukuran akurat yang dilakukan dengan Pemindaian Permukaan 3D menunjukkan bahwa luasnya sebenarnya adalah 22,85 meter. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran video setara dengan skala sekitar 1:6,24, menggarisbawahi perbedaan substansial antara metode pemindaian yang akurat dan estimasi visual dalam evaluasi struktural, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 9-10.



Gambar 10. Lebar Pilecap Pier 3 berdasarkan dokumentasi video CCTV

Inspeksi geometris Jembatan Mahakam I dilakukan dengan menggunakan Leica P30

Terrestrial Laser Scanner untuk menilai geometri bagian-bagian utama jembatan. Pengukuran difokuskan pada camber rangka jembatan, titik-titik pile cap pilar, dan vertikalitas pilar, dengan titik-titik pengukuran ditentukan dari data sekunder, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Ukuran tiang pancang 3 berdasarkan hasil pengukuran geometri 3D Surface Scan.



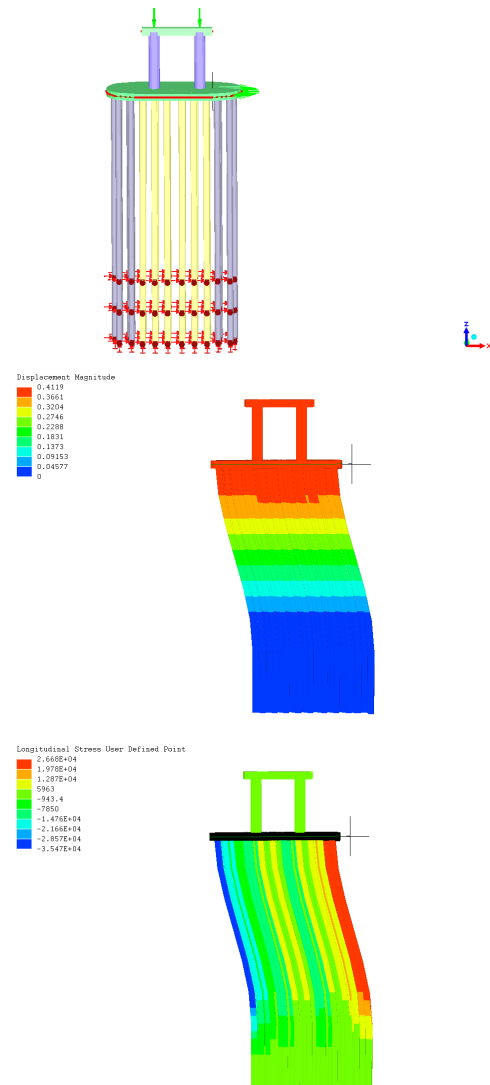
Gambar 12. Pergerakan lateral saat terjadi benturan kapal

Perbedaan substansial antara estimasi visual dan pengukuran yang tepat ditemukan antara perpindahan yang diamati sebesar 2,57 meter berdasarkan analisis video dan perpindahan aktual sekitar 0,41 meter setelah menerapkan rasio skala akurat 3D Surface Scan (1:6,24) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Pemeriksaan menyeluruh terhadap hasil video, termasuk lokasi titik pengambilan video, sudut arah tubrukan kapal, dan arah pergerakan akibat tubrukan, diperlukan untuk mendapatkan

hasil faktual mengenai perilaku tubrukan kapal yang menabrak pilecap dermaga 3 jembatan. Hasil ini hanya merupakan pengamatan sementara. Berdasarkan hasil pengukuran di atas, dilakukan pemodelan bangunan dermaga 3 dengan memberikan beban mati dan lalu lintas yang terjadi sesuai dengan waktu kejadian dengan nilai beban titik pada dermaga 3 yang bekerja pada masing-masing bearing pad sebesar 1000 kN, sesuai dengan hasil perhitungan yang direkap pada tabel 2.

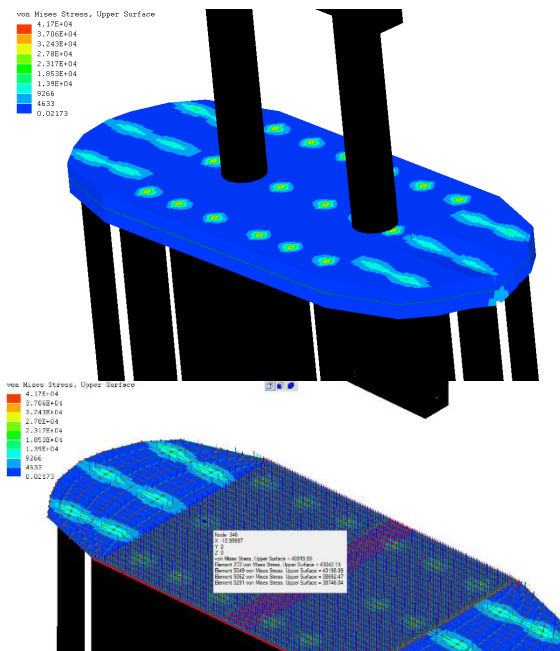
Tabel 2. Rekapitulasi beban yang bekerja pada setiap pilar.

Support	Load (kN)	Number of Bearing Pads	Load working on the Bearing Pad (kN)
Abutment 1 (A1)	2500 kN	4	625 kN
Central Pier	4000 kN	4	1000 kN
Abutment 2 (A2)	1500 kN	4	375 kN



Gambar 13. Pergeseran lateral dan tekanan yang terjadi

Tegangan pada tiang pancang menunjukkan nilai sebesar 26.680 kN/m² pada tiang pancang lokasi tubrukan kapal di sisi hulu jembatan dan tegangan sebesar 35.470 kN/m² pada tiang pancang di sisi hilir jembatan Mahakam. Dimana tegangan ijin pipa baja adalah 240 MPa = 240.000 kN/m² Dimana tegangan yang terjadi lebih kecil yaitu 635.470 kN/m², maka tegangan yang terjadi masih dalam kondisi yang diijinkan.



Gambar 14. Distribusi tegangan yang terjadi pada Pilecap Dermaga 3 Jembatan Mahakam

Simulasi beban tumbukan pada dermaga, berdasarkan perpindahan lateral jembatan yang teramati saat tumbukan, menunjukkan adanya pergerakan lateral sebesar 0,41 m. Tegangan tekan maksimum yang terjadi mencapai 43.198,89 kN/m² seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12, yang melebihi tegangan tekan yang diijinkan dari bahan tersebut, yang dihitung sebesar 0,45 fc' dimana fc' = 20 MPa, yang menghasilkan batas 9.000 kN/m². Pelampauan ini mengindikasikan dimulainya keretakan, dan hasil simulasi menunjukkan potensi kerusakan pada permukaan beton pile cap, sebagaimana divalidasi oleh bukti visual pada Gambar 7.

Tabel 3. Allowable Story Drift.

Table 12.12-1 Allowable Story Drift, $\Delta_s^{a,b}$			
Structure	Risk Category		
	I or II	III	IV
Structures, other than masonry shear wall structures, four stories or less above the base as defined in Section 11.2, with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts	0.025h _{sx} ^c	0.020h _{sx}	0.015h _{sx}
Masonry cantilever shear wall structures ^d	0.010h _{sx} ^c	0.010h _{sx} ^c	0.010h _{sx} ^c
Other masonry shear wall structures	0.007h _{sx} ^c	0.007h _{sx} ^c	0.007h _{sx} ^c
All other structures	0.020h _{sx} ^c	0.015h _{sx}	0.010h _{sx}

^ah_{sx} is the story height below level x.

^bFor seismic-force-resisting systems solely comprising moment frames in Seismic Design.

Categories D, E, and F, the allowable story drift shall comply with the requirements of Section 12.12.1.1.

^cThere shall be no drift limit for single-story structures with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts. The structure separation requirement of Section 12.12.3 is not waived.

^dStructures in which the basic structural system consists of masonry shear walls designed as vertical elements cantilevered from their base or foundation support that are so constructed that moment transfer between shear walls (coupling) is negligible.

Drift yang diijinkan struktur didefinisikan sebagai $0,02 \times h_x$, dimana $h_x = 40$ m, menghasilkan batas drift 0,8 m. Perpindahan lateral yang disimulasikan sebesar 0,41 m masih berada di dalam rentang yang diijinkan ini. Selanjutnya, dalam kondisi berdiri bebas dengan tinggi efektif 30 m, batas drift dikurangi menjadi 0.6 m. Perpindahan yang diamati sebesar 0.41 m masih dalam ambang batas ini, yang mengindikasikan bahwa struktur masih berada dalam kriteria drift yang dapat diterima dalam kedua kondisi tersebut. Kejadian tubrukan kapal menyebabkan integritas struktur jembatan menurun secara signifikan. Komponen beton menunjukkan kerusakan yang paling parah, terutama pada pile cap dermaga bagian hilir, yang mengalami keretakan selebar 1,2 dan 1,3 mm, melebihi ambang batas keamanan yang disarankan untuk kinerja jembatan. Dengan lebar berkisar antara 0,4 hingga 0,7 meter, retakan ini mencapai panjang maksimum 4,57 meter, yang menunjukkan adanya tekanan struktural yang signifikan dan kemungkinan kegagalan progresif. Selain itu, tulangan internal terlihat mengalami keretakan beton, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya korosi dan kerusakan material dalam jangka panjang.

Pemeriksaan pascakejadian terhadap sambungan ekspansi jembatan menunjukkan adanya pergeseran yang signifikan antara tahun 2018 hingga 2025, dengan lebar sambungan sisi kiri meningkat dari 4,3 cm menjadi 5,2 cm



secara bertahap, sementara sisi kanan menunjukkan pola perubahan yang tidak menentu. Pola ini mengindikasikan regangan struktural berkelanjutan akibat pengaruh lingkungan, beban kumulatif, dan dampak tumbukan. Deformasi juga terdeteksi pada lapisan fiber-reinforced polymer (FRP), termasuk robekan sepanjang 5 meter akibat gesekan tulangan baja. Analisis FEM mengungkap redistribusi tegangan signifikan dengan tegangan tarik maksimum mencapai 75 MPa, melebihi batas luluh material, menegaskan kebutuhan akan penguatan struktural. Ketidakakuratan visual teridentifikasi melalui perbandingan antara rekaman CCTV dan pemindaian 3D, yang menunjukkan kesalahan estimasi dimensi pile cap dan perpindahan lateral dengan faktor skala sekitar 1:6,24. Beban dampak menghasilkan tegangan tekan hingga 43.198,89 kN/m², jauh di atas batas yang diizinkan, meskipun perpindahan lateral 0,41 meter masih dalam batas drift maksimum. Dari analisis distribusi beban, Dermaga 3 mampu menahan beban hingga 1.000 kN per bantalan, namun tumpuan lain lebih rendah. Tegangan maksimum pada tiang pancang sisi hilir sebesar 35.470 kN/m² masih di bawah ambang batas yang diizinkan, namun tingginya tegangan tekan beton menekankan pentingnya tindakan perbaikan struktural yang tepat sasaran.

KESIMPULAN

Kerusakan katastropik ditemukan dalam investigasi struktur pasca benturan Jembatan Mahakam I, terutama pada pier pile cap bagian hilir, di mana lebar retakan melebihi batas kemampuan layan normal dan mencapai 1,2-1,3 mm. Risiko korosi meningkat akibat retakan sepanjang 4,57 meter dan tulangan yang terbuka akibat spalling. Selain itu, kegagalan struktur lokal diindikasikan oleh tegangan tekan pile cap sebesar 43.198,89 kN/m², yang jauh lebih tinggi dari batas yang diijinkan yaitu 9.000 kN/m² (berdasarkan 0,45 × f_c' , di mana $f_c' = 20$ MPa). Tetapi perpindahan

lateral tetap berada pada 0,41 m, yang berada di dalam batas penyimpangan 0,8 m (yang setara dengan 0,02 × 40 m), sehingga menjamin bahwa toleransi desain terpenuhi.

Selain itu, sambungan ekspansi menunjukkan distorsi yang signifikan dari waktu ke waktu, terutama di sisi kiri, yang tumbuh sebesar 20,9% dari tahun 2018 hingga 2025, dari 4,3 cm menjadi 5,2 cm. Di sisi lain, sisi kanan meningkat 11,1% pada periode waktu yang sama, dari 1,8 cm menjadi 2 cm, namun berfluktuasi tetapi sebagian besar tetap konstan. Setiap bantalan di Dermaga 3 memikul 1.000 kN, menurut analisis distribusi beban, sementara Abutmen 1 dan Abutmen 2 masing-masing memikul 625 kN dan 375 kN. Tegangan tiang pancang tetap berada dalam batas yang diizinkan, memuncak di hilir pada 35.470 kN/m², jauh di bawah tegangan yang diizinkan untuk pipa baja sebesar 240.000 kN/m². Temuan ini menunjukkan bahwa sementara stabilitas struktural global saat ini terjaga, kerusakan lokal dan komponen yang mengalami tekanan berlebih memerlukan perbaikan, pemeriksaan terperinci yang mendesak, dan pemantauan kesehatan struktural jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aco Wahyudi Efendi, 2025. Structural Assessment of Mahakam Bridge Geometry Using Geodetic GPS and Terrestrial Laser Scanner. *Jurnal Sainstech Nusantara*, 2(1), pp.53–65.
- [2] Brown, N.K., 2013. *Strain limits for concrete filled steel tubes in AASHTO seismic provisions*. Available at: <<https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/8871/etd.pdf?sequence=2>>.
- [3] Chen, L., Jiang, L., Li, R., Li, Q., Zhang, M. and ..., 2019. A feasible vibration measurement and active control method of reinforced concrete lightweight pier railway bridges for heavy-haul monorail trains. *European Journal of* [online]



- <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1663267>.
- [4] Costas, M., 2013. Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, [online] 62, pp.166–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.06.011>.
- [5] Cui, W., Liu, J. and Zhang, Y., 2022. Structural Response Analysis of Bridge Piers Under Ship Collision Using Finite Element Modeling. *Engineering Structures*, 252.
- [6] Deng, T., Zhang, J., Li, S. and Wang, Y., 2019. Anti-overturning stability coefficient of curved girder bridges considering seismic action. *Journal of Vibroengineering*. [online] Available at: <<https://www.jvejournal.com/article/20798>>.
- [7] Dorafshan, S. and Maguire, M., 2018. Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. [online] <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0285-4>.
- [8] Dráb, A., Duchan, D., Špano, M., Pavlíček, M. and ..., 2019. Determination of the Hydrodynamic Load on an Inundated Bridge Deck by Measurements Performed on a Physical Model. *International Journal of ...*. [online] <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00411-8>.
- [9] EFENDI, A., 2024. STRUCTURAL BEHAVIOR OF WIND FRAME TRUSSES IN BRIDGES AFTER CRASHES USING LISA V8 FEA. *Quantum Journal of Engineering, Science and ...*. [online] Available at: <<https://www.qjoest.com/index.php/qjoest/article/view/181>>.
- [10] Efendi, A.W., 2022a. Behavior Analysis of Building Structures After a Fire with FEA LISA V. 8. *Kurva S: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik* [online] Available at: <<http://ejurnal.untag-smd.ac.id/index.php/TEKNIKD/article/view/6413>>.
- [11] Efendi, A.W., 2022b. Behavior of railroad bearing due to temperature and load using LISA FEA. *Journal of Railway Transportation and Technology*. [online] Available at: <<https://jrtr.org/index.php/jrtr/article/view/1>>.
- [12] Efendi, A.W., 2022c. Repair analysis of Pinang Bridge oporit subsidence with mortar form using LISA FEA. *Journal of Research and Inovation in Civil* [online] Available at: <<https://jurnal.politap.ac.id/index.php/rigid/article/view/1193>>.
- [13] Efendi, A.W., 2023a. Behavior of Railroad Bridge Girders Due to Brake Loads with LISA V. 8 FEA. ... *Conference on Railway and Transportation (ICORT* [online] Available at: <<https://www.atlantispress.com/proceedings/icort-22/125985594>>.
- [14] Efendi, A.W., 2023b. Behavior of Railroad Bridge Girders Due to Brake Loads with LISA V. 8 FEA. ... *Conference on Railway and Transportation (ICORT* [online] Available at: <<https://www.atlantispress.com/proceedings/icort-22/125985594>>.
- [15] Efendi, A.W., 2023c. Desain Kandang Sperma Ideal untuk Sapi menggunakan LISA V. 8 FEA. *Jurnal Sintesis: Penelitian Sains, Terapan dan* [online] Available at: <<https://www.jurnal.iik.ac.id/index.php/jurnalsintesis/article/view/71>>.
- [16] Efendi, A.W., 2023d. Simulation of fire exposure behavior to building structural elements using LISA FEA V. 8.



-
- International Journal of Advanced Science and* [online] Available at: <<http://www.ijasca.org/index.php/ijasca/article/view/31>>.
- [17] Efendi, A.W., 2023e. Simulation of fire exposure behavior to building structural elements using LISA FEA V. 8. *International Journal of Advanced Science and* [online] Available at: <<http://www.ijasca.org/index.php/ijasca/article/view/31>>.
- [18] Efendi, A.W., 2023f. Stress Behavior of Rampdoor Jetty Bumi Harapan Port Sepaku-IKN Using LISA FEA V. 8. *Jurnal Rekayasa Mesin Dan Inovasi Teknologi* [online] Available at: <https://www.researchgate.net/profile/A-co-Efendi/publication/378555312_Stress_Behavior_of_Rampdoor_Jetty_Bumi_Harapan_Port_Sepaku-IKN_Using_LISA_FEA_V8/links/65e019dcadf2362b635ccf97/Stress-Behavior-of-Rampdoor-Jetty-Bumi-Harapan-Port-Sepaku-IKN-Using-LISA-FEA-V8.pdf>.
- [19] Efendi, A.W., 2023g. The Settlement Behavior Using Replacement Embankment with Mortar Foam and Geofoam using LISA FEA. *Nusantara Civil Engineering Journal*. [online] Available at: <<http://ojs.poltekba.ac.id/ojs/index.php/nuce/article/view/484>>.
- [20] Efendi, A.W., 2024a. APPLICATION OF CHATGPT IN THE ANALYSIS OF INTERNAL FORCES OCCURRING IN SIMPLE BEAMS USING LISA V. 8 FEA. *Selodang Mayang: Jurnal Ilmiah Badan* [online] Available at: <<https://ojs.selodangmayang.com/index.php/bappeda/article/view/313>>.
- [21] Efendi, A.W., 2024b. Behavior of welded joints on the roof truss of KOJK Office using LISA V. 8 FEA. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing* [online] Available at: <<http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/jmep/article/view/12020>>.
- [22] Efendi, A.W., 2024c. ChatGPT application in ground settlement analysis using LISA V. 8 FEA. *Research of Scientia Naturalis*. [online] Available at: <<https://journal.ypidathu.or.id/index.php/scientia/article/view/826>>.
- [23] Efendi, A.W., n.d. LISA FEA. *researchgate.net*. [online] Available at: <https://www.researchgate.net/profile/A-co-Efendi/publication/364959931_Repair_analysis_of_Pinang_Bridge_oprit_subsidence_with_mortar_form_using_LISA_FEA/links/63612e80431b1f53005fc528/Repair-analysis-of-Pinang-Bridge-oprit-subsidence-with-mortar-form-using-LISA-FEA.pdf>.
- [24] Efendi, A.W., Do, Y. and Rachman, N.F., 2022. Behavior of Rail Ballast Layer Using Mortar Foam with LISA-FEA. *Journal of Railway Transportation and* [online] Available at: <<https://www.jrtt.org/jrtt/article/view/8>>.
- [25] Efendi, A.W. and Safitri, N., 2024. Behavior of Cakar Ayam Modifikasi (CAM) foundation on soft soil with LISA V. 8 FEA. *Kurva S: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi* [online] Available at: <https://www.researchgate.net/profile/A-co-Efendi/publication/381226408_Behavior_of_Cakar_Ayam_Modifikasi_CAM_foundation_on_soft_soil_with_LISA_V8_FEA/links/6662669285a4ee7261ab122a/Behavior-of-Cakar-Ayam-Modifikasi-CAM-foundation-on-soft-soil-with-LISA-V8-FEA.pdf>.
- [26] Efendi, A.W. and Weijia, C., 2023a. Buffer stops behavior due to rail impact loads with LISA FEA. *Journal of Railway Transportation and Technology*. [online] Available at: <<https://jrtt.org/jrtt/article/view/20>>.
-



-
- [27] Efendi, A.W. and Weijia, C., 2023b. Buffer stops behavior due to rail impact loads with LISA FEA. *Journal of Railway Transportation and Technology*. [online] Available at: <<https://jrtr.org/jrtr/article/view/20>>.
- [28] EFENDI, I., 2022. Noise exposure impact zone hue modeling using LISA FEA V. 8. *Teknik: Jurnal Ilmu Teknik dan ...*. [online] Available at: <<https://journal.stiestekom.ac.id/index.php/TEKNIK/article/view/153>>.
- [29] Efendi, I.A.W., 2022d. Behavior Analysis of Forensic Audit Results at Pier 3 Mahakam Bridge. *PANRITA: Journal of Science, Technology, and Arts*. [online] Available at: <https://www.researchgate.net/profile/A-co-Efendi/publication/357554386_Behavior_Analysis_of_Forensic_Audit_Results_at_Pier_3_Mahakam_Bridge/links/62d64857d624055892756a96/Behavior-Analysis-of-Forensic-Audit-Results-at-Pier-3-Mahakam-Bridge.pdf>.
- [30] Ikard, S. and Pease, E., 2018. Preferential groundwater seepage in karst terrane inferred from geoelectric measurements. *Near Surface Geophysics*. [online] <https://doi.org/10.1002/nsg.12023>.
- [31] Irawan, R., Tukimun, T., & Wuaten, H. M. (2025). EVALUASI STRUKTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM JEMBATAN KUTAI KARTANEGARA. *Media Bina Ilmiah*, 19(11), 6349-6356.
- [32] Jihong, Y. and Liqiang, J., 2018. Collapse mechanism analysis of a steel moment frame based on structural vulnerability theory. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. [online] Available at: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1016/j.acme.2018.01.001.pdf>>.
- [33] Kamshilin, A.N. and Kaznacheev, P.A., 2018. Local Current Gauge: Instrument for Geoelectric Measurements. *Seismic Instruments*, [online] 54(5), pp.573–578. <https://doi.org/10.3103/s0747923918050079>.
- [34] Khalafalla, E.E. and Ali, A.H.M., 2020. Inspection and rehabilitation of old White Nile steel bridge substructure. *FES Journal of Engineering Sciences*. [online] Available at: <<http://journal.oiu.edu.sd/index.php/fjes/article/view/659>>.
- [35] Kim, H. and Lee, D., 2018. 'Fatigue behavior of FRP-reinforced steel structures under cyclic loading. *Engineering Structures*, 176, pp.45–56.
- [36] Li, S., Wang, X. and Zhou, Q., 2021. Risk Assessment of Bridge Structures Subjected to Accidental Ship Collisions." *Journal of Bridge Engineering*. *Journal of Bridge Engineering*, 26(3). <https://doi.org/04021006>.
- [37] Nguyen, Q.T.B., Ko, S.J., Jung, G., Lee, J.H., Yoo, M.T. and Kim, S.R., 2021. *Natural Frequency Measurement for Scour Damage Assessment of Caisson Pier*. [online] [kgsjournal.org](https://www.kgsjournal.org). Available at: <<https://www.kgsjournal.org/articles/xml/RaxE/>>.
- [38] Niu, Y., Ye, Y., Zhao, W., Duan, Y. and Shu, J., 2021. Identifying Modal Parameters of a Multispan Bridge Based on High-Rate GNSS–RTK Measurement Using the CEEMD–RDT Approach. *Journal of Bridge Engineering*. [online] <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29B.E.1943-5592.0001754>.
- [39] Nia, E. M., Awang, M., Aulady, M. F. N., Traykova, M., & Yola, L. (Eds.). (2025). Selected Articles from the 8th International Conference on Architecture and Civil Engineering: ICACE 2024, 12-13 December, Penang, Malaysia (Vol. 635). Springer Nature.
- [40] Prabowo, S. H., & Admaja, W. M. T. (2025). Evaluation of the Condition and Prediction of the Remaining Life of the
-



- Old Kutai Bridge Using the Bridge Management System (BMS). *ARRUS Journal of Engineering and Technology*, 5(1), 27-37.
- [41] Prabowo, S. H., Suwito, T. D., & Admaja, W. M. T. (2025). ANALISIS KERUSAKAN, PROGRAM PENANGANAN, DAN ESTIMASI BIAYA REHABILITASI JEMBATAN KUTAI LAMA DENGAN BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM. *Jurnal Teknik Gradien*, 17(01), 127-137.
- [42] Sabuwala, T., Linzell, D. and Krauthammer, T., 2005. Finite element analysis of steel beam to column connections subjected to blast loads. ... *Journal of Impact Engineering*. [online] Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X04000806>>.
- [43] Saïdi, M.S., O'Brien, M. and ..., 2009. Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete. ... *Structural Journal*. [online] Available at: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true%5C&profile=ehost%5C&scope=site%5C&authtype=crawler%5C&jrnl=08893241%5C&asa=Y%5C&AN=36207228%5C&h=AFHyuV3W25aCi6M0GNr%2FHW18E7efFCqkJIQnP8aE4Znool9smx17roLaT29qKLWJuW37Ze44YXgDuM9spz61Eg%3D%3D%5C&crl=c>>.
- [44] Sha, Y. and Hao, H., 2016. State-of-the-Art Review on Bridge Collapse Induced by Ship Collision. *Advances in Structural Engineering*, 19(4), pp.713–731.
- [45] Shegay, A. V, Motter, C.J., Elwood, K.J. and ..., 2018. Impact of axial load on the seismic response of rectangular walls. *Journal of Structural* [online] Available at: <[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002122](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002122)>.
- [46] Tarawneh, B., Bodour, W. Al and Masada, T., 2018. Inspection and risk assessment of mechanically stabilized earth walls supporting bridge abutments. *Journal of Performance of* [online] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001132).
- [47] Tarawneh, C., Aranda, J., Hernandez, V. and ..., 2020. An investigation into wayside hot-box detector efficacy and optimization. *International Journal* [online] <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1636721>.
- [48] Venglár, M., Sokol, M. and Ároch, R., 2018. Ambient vibration measurements of steel truss bridges. *Journal of Measurements in* [online] Available at: <<https://www.jvejournals.com/article/20419>>.
- [49] Vialis, T., Jarrige, J., Aanesland, A. and ..., 2018. Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster. *Journal of Propulsion and* [online] <https://doi.org/10.2514/1.B37036>.
- [50] Wang, Z., Chen, Y. and Liu, F., 2019. Impact Analysis and Retrofitting Strategies for Bridges Subjected to Vessel Collisions. *Marine Structures*, 66.
- [51] Wang, Z., Wu, C., Li, T., Xiao, W., Wei, H. and ..., 2020. Experimental Study on the Seismic Performance of Improved Grouted Corrugated Duct Connection (GCDC) Design for Precast Concrete Bridge Column. *Journal of Earthquake* [online] Available at: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632469.2020.1785356>>.
- [52] Ye, J., Jiang, L. and Wang, X., 2017. Seismic failure mechanism of reinforced cold-formed steel shear wall system based on structural vulnerability analysis. *Applied Sciences*. [online] Available at:



-
- <<https://www.mdpi.com/2076-3417/7/2/182>>.
- [53] Yuan, H., Hong, H.P., Deng, H. and Bai, Y., 2018. Displacement ductility of staged construction-steel tube-reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*. [online] Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818320816>>.
- [54] Zhang, H., Xu, W. and Li, P., 2020. Structural Vulnerability Analysis of Bridges under Accidental Load Scenarios. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(5).



HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN