



ANALISIS PERKUATAN STRUKTUR JEMBATAN DALAM KONDISI DI BAWAH BEBAN MUATAN MELEBIHI KAPASITAS

Indri Anggraeni

Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia
Surel: indrianggraeni346@gmail.com

ARTIKEL INFO

Kata Kunci:

Jembatan Kawah Ijen, perkuatan jembatan, portal baja, muatan khusus, kapasitas struktur.

Keywords:

Ijen Crater Bridge, bridge reinforcement, steel portal, special load, structure capacity

ABSTRACT

Bridges are sometimes crossed by vehicles with loads exceeding their capacity. For example, the Ijen Crater Bridge 2 in East Java will be crossed by heavy vehicles loaded with 109 tons of generators, while the bridge load capacity is only 56 tons. Therefore, a comprehensive condition evaluation and appropriate reinforcement recommendations are needed. The research methods used include visual inspection, non-destructive testing (NDT), and structural modelling using SAP2000 software. Through visual inspection, general damage to the bridge was identified. NDT was used to obtain quantitative data on the material's condition. The results of both methods are input into structural modelling to analyze bridge behaviour under operational loads. The analysis results indicate that the maximum capacity ratio of the structure is 0.796. This value is below 1, which means that the structural capacity has met the requirements after reinforcement. The maximum deflection value of the structure stiffness is 3.582 mm or less than the allowable deflection of 15 mm, which means it has met the criteria. The moment analysis after reinforcement produces a M_u value of 121.387 kNm, or still greater than the M_n value of 69.6 kNm. Therefore, it is recommended to strengthen the concrete floor slab structure according to the results, including the use of Carbon Fibre Reinforced Polymer. Steel portals are installed in the middle of the bridge span, and shallow foundations are built in the river flow area. This study demonstrates that bridge reinforcement necessitates a comprehensive analysis and solutions to ensure the safety of the bridge structure is maintained.

DOI: 10.58499/jatan.v42i1.1368

diterima: 08 Februari 2025;

direvisi: 06 Juni 2025;

disetujui: 07 Juni 2025

PENDAHULUAN

Sebuah perusahaan energi yang menjadi fokus penelitian telah sukses menyelesaikan tahap eksplorasi panas bumi di wilayah Ijen, Kabupaten Bondowoso, Jawa Timur. Perusahaan ini kini siap memasuki fase eksploitasi. Untuk mendukung kelancaran proses eksploitasi, infrastruktur jembatan menjadi salah satu aspek krusial yang harus diperhatikan, terutama untuk memfasilitasi mobilisasi peralatan berat yang diperlukan (Nurdiyanto 2022). Pengangkutan peralatan berat seperti *generator*, *air cooled*, *preheater*, dan *vaporizer* melintasi jembatan menggunakan kendaraan khusus *axle lines*. Tujuannya adalah untuk meminimalisasi dan mendistribusikan beban terpusat secara merata pada permukaan jembatan. Dengan optimasi distribusi beban ini, tegangan yang bekerja pada struktur jembatan dapat dikurangi secara signifikan sehingga meningkatkan daya dukung dan umur layan jembatan. Pendekatan ini merupakan langkah penting dalam menjaga integritas struktur jembatan, terutama saat dilalui oleh muatan yang melebihi kapasitas normal (Ge, Dan, and Li 2020).

Analisis mendalam terhadap kondisi jembatan menunjukkan bahwa 3,28% kerusakan jembatan disebabkan oleh kelebihan beban (Garg, Chandra, and

Kumar 2022). Baik pada jembatan baja maupun beton, material merupakan titik lemah ketika dihadapkan pada beban yang melebihi kapasitas desain jembatan. Fenomena kelebihan muatan kendaraan semakin memperburuk masalah karena beban berulang yang dihasilkan dapat menyebabkan retak mikro dan mempercepat proses kelelahan material. Untuk mengatasi permasalahan ini, perlu dilakukan pengawasan terhadap berat muatan kendaraan, perbaikan desain jembatan, serta pemeliharaan berkala yang lebih intensif.

Analisis terhadap jembatan baja mengungkapkan penurunan tingkat kinerja sebesar 10% yang disebabkan oleh kelelahan material akibat beban dinamis dari kendaraan yang kelebihan muatan (Garg, Chandra, and Kumar 2022). Fenomena ini terjadi karena beban berlebih melampaui batas desain, mengakibatkan siklus tegangan-regangan yang berulang pada struktur baja. Akumulasi kerusakan mikro dalam jangka panjang dapat mengurangi kapasitas beban jembatan dan meningkatkan risiko kegagalan. Kondisi ini mengindikasikan risiko kegagalan yang semakin tinggi, mengancam keselamatan pengguna jalan dan infrastruktur vital. Situasi serupa telah membuktikan betapa parahnya



dampak beban berlebih terhadap umur pakai jembatan. Tercatat angka kegagalan mencapai 12,76% hingga 17,78% studi terbaru dari berbagai belahan dunia menunjukkan bahwa masalah kelebihan beban pada jembatan semakin mengkhawatirkan. Temuan ini mengindikasikan adanya tren peningkatan kegagalan sistem secara global akibat meningkatnya tuntutan terhadap kinerja jembatan (Ede *et al.* 2019; Tan *et al.* 2020).

Inventarisasi jembatan adalah langkah strategis untuk menjamin keberlanjutan infrastruktur. Inspeksi visual menjadi langkah awal yang sangat krusial dalam upaya pemeliharaan dan evaluasi kondisi jembatan, memegang peranan vital dalam mengidentifikasi secara dini jenis kerusakan, keausan, atau tanda-tanda kelemahan struktur yang terjadi pada komponen jembatan, seperti bentang utama, abutment, pilar dan komponen penunjang lainnya (Garnida, Syukri, and Rosadi 2023; Campbell *et al.* 2020).

Kegagalan sebagian atau keseluruhan dari komponen tersebut dapat berdampak signifikan terhadap kinerja jembatan secara keseluruhan, mulai dari penurunan kapasitas beban, peningkatan defleksi, hingga potensi runtuhnya struktur. Dampaknya akan mengganggu kelancaran lalu lintas dan berpotensi menimbulkan kerugian yang besar, baik secara ekonomi maupun sosial (Anastasiadis 2021). Kejagan integritas dan keamanan jembatan serta pencegahan terhadap kegagalan struktur dilakukan melalui inspeksi berkala secara rutin (Kumar *et al.* 2008).

Namun, praktik inspeksi visual yang selama ini umum dilakukan memiliki beberapa keterbatasan. Subjektivitas dalam penafsiran hasil inspeksi oleh inspektur, ketidakpastian dalam deteksi kerusakan yang tersembunyi di dalam material, serta keterbatasan jangkauan visual dalam mendeteksi cacat pada area yang sulit diakses menjadi beberapa kendala utama. Selain itu, inspeksi visual hanya mampu memberikan informasi kualitatif mengenai kondisi jembatan, tanpa memberikan data kuantitatif yang akurat mengenai tingkat kerusakan dan sisa umur layan struktur (Khedmatgozar Dolati *et al.* 2021).

Untuk mengatasi keterbatasan inspeksi visual, teknologi *non-destructive test* (NDT) telah banyak diaplikasikan dalam inspeksi jembatan. Beberapa metode NDT yang umum digunakan antara lain *ultrasonic thickness gauge* untuk mengukur ketebalan pelat baja (Iskandar and Yusup 2021), *steel hardness test* untuk mengukur kekerasan baja (Chi and Peng 2020), *hammer test* untuk mengestimasi modulus elastisitas beton (Shubbar *et al.* 2020), *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* untuk mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik dalam beton (Hong *et al.* 2020), dan *rebar scan* untuk mendeteksi lokasi dan diameter tulangan beton (Rathod *et al.* 2019; Peachtree *et al.* 2022). Metode-

metode NDT ini mampu memberikan data kuantitatif yang lebih akurat mengenai kondisi material dan struktur jembatan sehingga dapat membantu dalam mendeteksi kerusakan secara lebih dini dan lebih akurat (Darshakkumar 2015; Qurishee *et al.* 2019). Meskipun teknologi NDT telah memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan keandalan inspeksi jembatan, hasil dari inspeksi NDT belum cukup untuk memberikan gambaran yang lengkap mengenai kondisi keseluruhan jembatan dan kemampuannya dalam menahan beban yang direncanakan.

Oleh karena itu, analisis numerik menggunakan perangkat lunak komprehensif menjadi langkah selanjutnya yang sangat penting. Melalui analisis numerik dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000, dapat dievaluasi kondisi aktual struktur jembatan untuk memprediksi perilaku struktur di bawah beban yang berbeda, dan mengidentifikasi area-area kritis yang memerlukan perhatian khusus. Hasil analisis ini kemudian dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan tindakan perbaikan yang diperlukan, seperti perbaikan lokal, penggantian komponen, atau rehabilitasi menyeluruh. Secara keseluruhan, kombinasi antara inspeksi visual, teknologi NDT, dan pemodelan struktur merupakan pendekatan yang komprehensif dalam memastikan keamanan dan keberlanjutan jembatan. Dengan mengadopsi pendekatan ini, dapat diambil keputusan yang lebih tepat terkait dengan pemeliharaan, rehabilitasi, dan penggantian jembatan untuk meminimalkan risiko kegagalan struktur dan menjaga kelancaran lalu lintas.

Sebuah sistem perbaikan baru menggunakan batang *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* prategang dan angkur mekanis telah dikembangkan. Material ini telah diuji untuk mengurangi deformasi di luar bidang pada koneksi sudut ganda *stringer-ke-floor beam* yang rentan terhadap kelelahan pada jembatan rivet tua (Heydarinouri *et al.* 2021; Ghulam R and Ruslan 2015). Hasil simulasi dan uji laboratorium menunjukkan efektivitas sistem dalam mengurangi tegangan dan meningkatkan ketahanan lelah, yang berpotensi digunakan sebagai solusi perkuatan. Penelitian ini akan mengevaluasi solusi atau metode terkait lebih lanjut.

Penelitian ini berfokus mendalam pada analisis dan kinerja pilar penyangga jembatan. Meskipun CFRP merupakan bagian integral dari sistem perbaikan yang dikembangkan, perannya dalam konteks penelitian ini adalah sebagai alternatif penguatan tambahan untuk meningkatkan kinerja pelat lantai. Dengan kata lain, penelitian ini secara spesifik mengeksplorasi respons dan perilaku jembatan ketika dilakukan perkuatan

dengan metode penambahan pilar penyangga (Setiati *et al.* 2021; Lanneke Tristanto, n.d.).

HIPOTESIS

Hasil pengujian non-destruktif (NDT) dan analisis numerik saling melengkapi dalam memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kondisi jembatan. Data dari pengujian NDT dapat digunakan untuk memvalidasi model dan parameter dalam analisis numerik, sedangkan hasil analisis numerik dapat digunakan untuk memprediksi kinerja jembatan, terutama setelah perkuatan. Korelasi yang kuat antara hasil pengujian NDT dan analisis numerik menunjukkan bahwa metode evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini reliabel dan dapat diandalkan untuk menilai kondisi jembatan dan solusi perkuatan yang diterapkan dengan penambahan pilar penyangga pada gelagar.

METODOLOGI

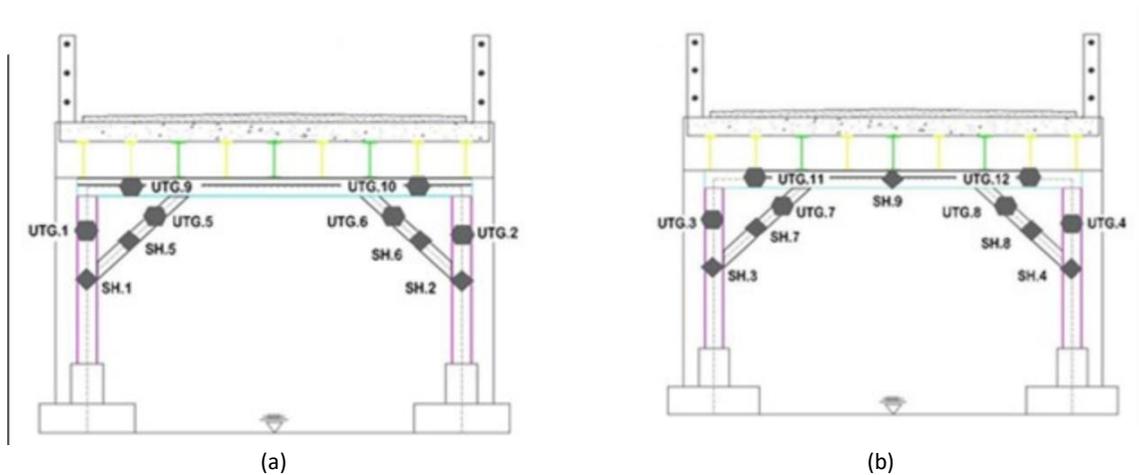
Lokasi

Studi ini berfokus pada evaluasi kondisi Jembatan Kawah Ijen 2, salah satu dari empat belas

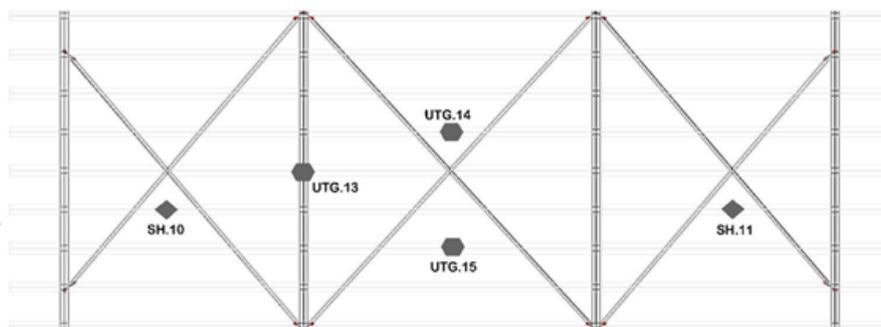
jembatan yang dilalui dalam rute perjalanan darat dari Pelabuhan Surabaya menuju area eksploitasi Kawasan Ijen, Bondowoso. Rute tersebut merupakan jalur vital yang melintasi wilayah Sidoarjo, Probolinggo, dan Pantura, serta mencakup jalan-jalan daerah di Bondowoso. Kajian mendalam saat ini difokuskan pada Jembatan Kawah Ijen 2 yang menunjukkan indikasi kerusakan dengan adanya dua pilar portal eksisting pada kedua sisi abutment jembatan, sehingga abutment diasumsikan sebagai sendi. Secara spesifik jembatan ini terletak pada titik koordinat (7°57'6.97"S 113°59'10.82"E).

Tahapan Penelitian

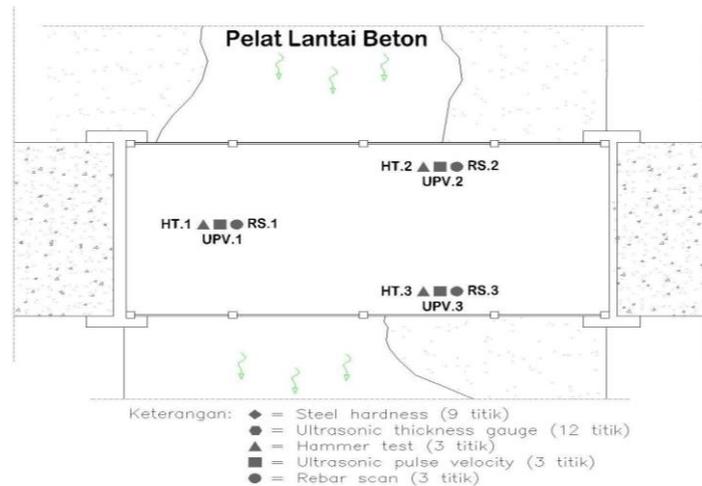
Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi kinerja struktur yang terbagi menjadi empat tahapan. Tahap pertama adalah pengumpulan data primer yang terdiri atas pemeriksaan visual berupa data profil jembatan, dan non-destructive test berupa steel hardness, ultrasonic thickness gauge, hammer test, UPV dan rebar scan. Sampel pengujian diambil sebanyak 35 titik sesuai dengan NDT Map pada Gambar 1.



Gambar 1. Setup Balok Uji



Gambar 2. NDT Map girder memanjang dan melintang

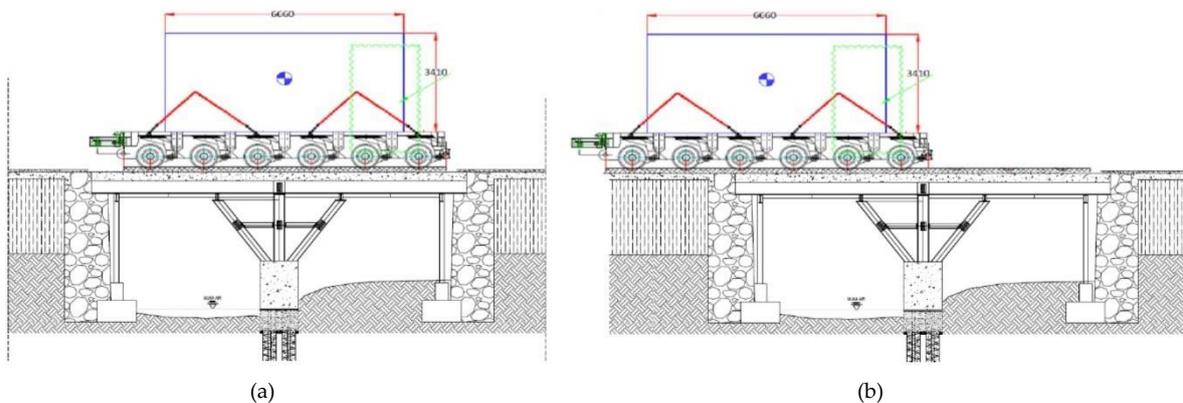


Gambar 3. NDT Map pelat lantai beton

Tahap kedua adalah pemodelan struktur jembatan. Tahap ini melibatkan pembuatan model struktur jembatan yang akurat menggunakan perangkat lunak analisis struktur, seperti SAP2000. Model ini harus mencerminkan kondisi aktual jembatan di lapangan, termasuk dimensi, material, dan detail struktural lainnya. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa model memiliki perilaku yang sesuai dengan kondisi jembatan yang sebenarnya.

Pada tahap ketiga, dilakukan analisis struktur berbasis gaya. Pada tahap ini, model struktur jembatan akan dianalisis untuk mengetahui responnya terhadap

berbagai jenis beban. Beban-beban yang dipertimbangkan meliputi beban mati yang berasal dari berat struktur jembatan dan beban mati tambahan yang berasal dari aspal dan pelat baja tambahan. Berikutnya adalah beban hidup yang berasal dari kendaraan axle lines beserta muatannya. Pembebanan hidup dibagi menjadi dua kondisi. Pertama adalah ketika *axle lines* dengan 48 roda berada tepat di tengah bentang jembatan seperti terlihat pada gambar Gambar 2. Kedua adalah ketika axle lines berada setengahnya pada ujung jembatan dengan jumlah 24 roda yang bertumpu pada jembatan.



Gambar 4. Beban axle lines dan generator (a) 48 roda (b) 24 roda

Analisis ini dilakukan berdasarkan standar pembebanan jembatan yang berlaku pada SNI 1725:2016 Pembebanan pada jembatan. Hasil analisis ini akan memberikan informasi mengenai gaya-gaya yang terjadi pada elemen-elemen struktur jembatan akibat beban-beban tersebut. Tahap keempat adalah analisis perilaku jembatan berbasis kinerja. Di mana tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja jembatan berdasarkan level kinerja yang telah ditentukan. Level kinerja ini berkaitan dengan kemampuan jembatan dalam menahan beban,

deformasi yang terjadi, dan faktor keselamatan lainnya. Analisis ini akan memberikan informasi mengenai tingkat kinerja jembatan, apakah masih memenuhi persyaratan atau tidak.

Pemilihan metode perkuatan dilakukan jika hasil analisis menunjukkan bahwa kinerja jembatan tidak memenuhi persyaratan. Metode perkuatan yang dipilih berdasarkan pertimbangan kondisi lapangan dan berpedoman pada hasil analisis SAP2000 yang telah dinyatakan layak secara kekuatan dan kekakuan. Artinya, metode perkuatan yang dipilih harus mampu

meningkatkan kekuatan dan kekakuan jembatan sehingga memenuhi persyaratan kinerja yang diinginkan.

HASIL DAN ANALISIS

Pemeriksaan Visual dan Pengujian Tak Merusak (NDT)

Hasil pemeriksaan visual mengindikasikan adanya kerusakan ringan pada komponen jembatan akibat korosi tingkat rendah. korosi tersebut hanya terjadi sedikit pada bagian *bracing* saja. untuk

memastikan kondisi bagian dalam elemen-elemen dan mendapatkan data yang lebih akurat, diperlukan pengujian NDT lanjutan seperti yang akan diuraikan dibawah ini (Zheng *et al.* 2022; Abdelkader, Zayed, and Faris 2023).

Hasil Pengujian Steel Hardness

Pengujian kekerasan baja telah dilakukan pada beberapa titik di bagian web dan flange jembatan. Hasil pengujian kekerasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan rekapitulasi lengkap dari data hasil uji disajikan secara rinci pada Tabel 2.



Gambar 5. Pengujian steel hardnes

Tabel 1. Hasil pemeriksaan *steel hardness*

Bagian Struktur	Tipe Baja	Steel Hardness	
		Fy (Mpa)	Fu (MPa)
Kolom	WF 300.150.5.7	296,24	370,30
Kolom	WF 300,150,5,7	265,40	331,75
Kolom	WF 300.150.5.7	319,02	398,77
Kolom	WF 300.150.5.7	318,16	397,70
Balok portal	WF 250.125.4,36.7,33	323,0	403,70
Voute	WF 175.90.3,62.6,5	332,06	415,08
Voute	WF 175.90.3,62.6,5	315,08	393,85
Voute	WF 175.90.3,62.6,5	272,40	340,50
Voute	WF 175.90.3,62.6,5	295,95	369,94
Gelagar	WF 400.150.8,4.5,8	323,11	403,89
Gelagar	WF 200.100.4,5.8.4	336,38	420,48

Hasil Ultrasonic Thickness Gauge

Untuk mengevaluasi tingkat korosi dan degradasi material, pengujian ketebalan baja dilakukan

dengan memanfaatkan *ultrasonic thickness gauge*. Visualisasi proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 5, dan Tabel 3 merangkum data hasil pengukuran ketebalan baja pada setiap titik pengujian.



Gambar 6. Ultrasonic thickness gauge pada kolom pilar portal

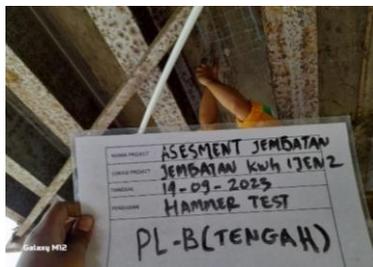
Tabel 2. Hasil ultrasonic thickness gauge

Bagian Struktur	Tipe Baja	UTG	
		Flange (mm)	Web (mm)
Kolom	WF 300.150.5.7	7,20	5,20
Kolom	WF 300.150.5.7	7,55	5,25
Kolom	WF 300.150.5.7	6,55	5,00
Kolom	WF 300.150.5.7	6,95	5,00
Balok portal	WF 250.125.4.36.7,33	7,60	4,10
Balok portal	WF 175.90.3.62.6,5	7,60	4,20
Balok portal	WF 175.90.3.62.6,5	6,90	4,70
Balok portal	WF 175.90.3.62.6,5	7,60	4,10
Voute	WF 175.90.3.62.6,5	6,55	3,50
Voute	WF 175.90.3.62.6,5	6,50	3,65
Voute	WF 175.90.3.62.6,5	6,40	3,60
Voute	WF 175.90.3.62.6,5	6,40	3,70
Balok	WF 200.100.4.5.8.4	6,60	4,50
Balok	WF 400.150.8.4.5.8	8,40	5,50
Balok	WF 400.175.8.4.5.8	8,40	5,80

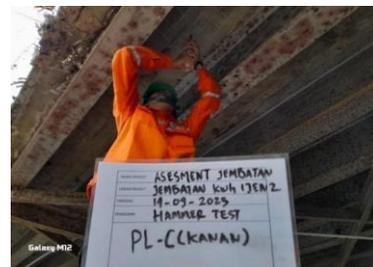
Hasil Uji Hammer

Pengujian kekerasan permukaan dengan metode hammer test dilakukan pada elemen struktur pelat beton. Titik pengujian hammer test ini berlokasi sama dengan titik pengujian UPV untuk mendapatkan korelasi data yang lebih akurat. Hasil pengujian menunjukkan nilai rata-rata rebound number berkisar antara 44,25 hingga 46, yang berkorespondensi dengan estimasi kuat tekan antara 40,75 - 44,20 N/mm². Variasi nilai rebound number ini mengindikasikan bahwa mutu beton pada struktur pelat tidak seragam,

kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti perbedaan komposisi material, proses pengecoran, atau proses perawatan beton. Data yang didapatkan dari hasil pengujian hammer hanya digunakan sebagai pembandingan dan untuk memastikan bahwa hasil dari pengujian UPV dapat diterima dengan baik. Dokumentasi pengujian hammer dapat dilihat pada Gambar 6, sedangkan rekapitulasi lengkap hasil uji disajikan pada Tabel 4.



(a)



(b)

Gambar 7. Pengujian Hammer pada pelat lantai

Tabel 3. Hasil Hammer Test

Bagian Struktur	Rebound Rata-rata	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Kuat Tekan (N/mm ²)
Pelat lantai	46,00	450,80	44,20
Pelat lantai	44,63	418,10	41,00
Pelat lantai	44,25	415,60	40,75

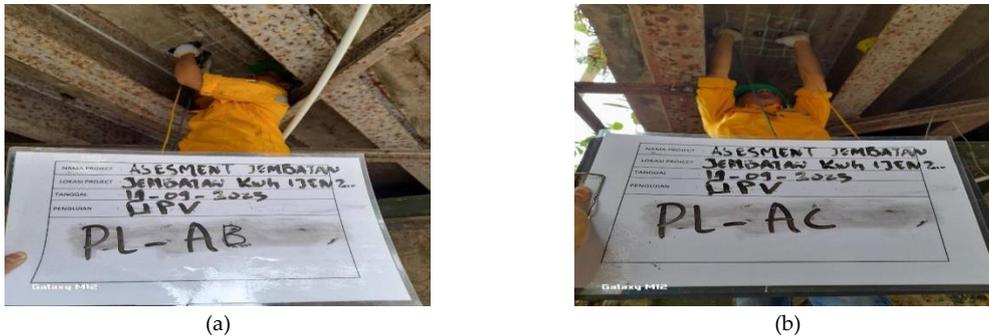
Hasil Uji UPV

Pengujian UPV pada pelat lantai jembatan bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan integritas beton secara nondestruktif. Metode ini mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui beton. Kecepatan yang tinggi mengindikasikan beton yang padat dan kuat, sementara kecepatan yang lebih rendah dapat mengindikasikan adanya rongga, retakan, atau

penurunan kualitas beton. Data UPV membantu mengidentifikasi area-area yang berpotensi bermasalah pada pelat lantai sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan untuk memastikan keamanan dan umur panjang struktur jembatan. Gambar 7 menunjukkan proses pengujian UPV pada pelat lantai, sedangkan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5. Meskipun terdapat dua parameter data yang disajikan, nilai

parameter input yang secara komprehensif digunakan dalam pemodelan adalah nilai rata-rata dari hasil pengujian UPV. Hal ini disebabkan oleh akurasi pengujian UPV yang mampu mendeteksi sampai

bagian dalam beton sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan *hammer test*.



Gambar 8. Pengujian UPV pada pelat lantai

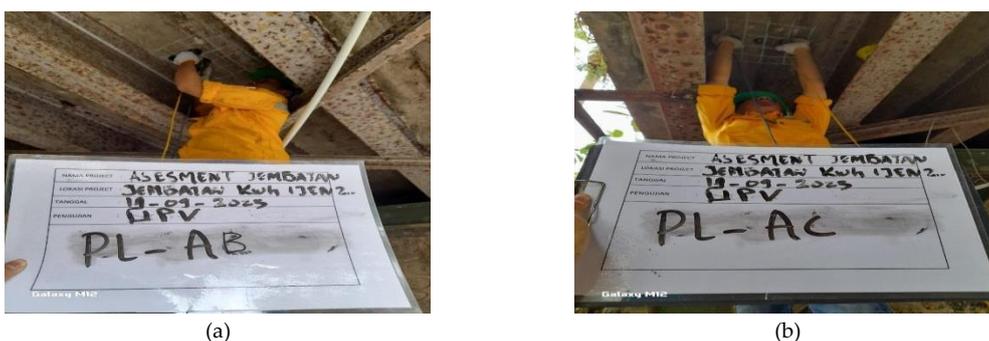
Tabel 5. Hasil Rebar Scan

Bagian Struktur	Diameter		Tebal Rata-rata		Rata-rata Jarak	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pelat Lantai	16-19	16-19	40,60	40,60	155,50	148,00
Pelat Lantai	16-19	16-19	39,80	40,00	159,25	156,25
Pelat Lantai	16-19	16-19	35,60	38,00	161,50	160,00

Hasil Uji UPV

Pengujian UPV pada pelat lantai jembatan bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan integritas beton secara nondestruktif. Metode ini mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui beton. Kecepatan yang tinggi mengindikasikan beton yang padat dan kuat, sementara kecepatan yang lebih rendah dapat mengindikasikan adanya rongga, retakan, atau penurunan kualitas beton. Data UPV membantu mengidentifikasi area-area yang berpotensi bermasalah pada pelat lantai sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan untuk memastikan keamanan dan umur

panjang struktur jembatan. Gambar 8 menunjukkan proses pengujian UPV pada pelat lantai, sedangkan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5. Meskipun terdapat dua parameter data yang disajikan, nilai parameter input yang secara komprehensif digunakan dalam pemodelan adalah nilai rata-rata dari hasil pengujian UPV. Hal ini disebabkan oleh akurasi pengujian UPV yang mampu mendeteksi sampai bagian dalam beton sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan *hammer test*.



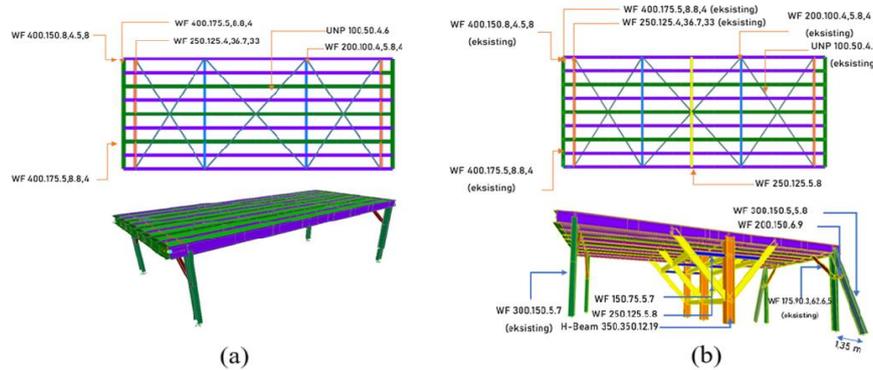
Gambar 9. Pengujian UPV pada pelat lantai

Tabel 5. Hasil Rebar Scan

Bagian Struktur	Diameter		Tebal Rata-rata		Rata-rata Jarak	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pelat Lantai	16-19	16-19	40,60	40,60	155,50	148,00
Pelat Lantai	16-19	16-19	39,80	40,00	159,25	156,25
Pelat Lantai	16-19	16-19	35,60	38,00	161,50	160,00

Pemodelan

Data rekapitulasi pemeriksaan visual dan NDT (dimensi, mutu baja, mutu beton, spesifikasi tulangan)



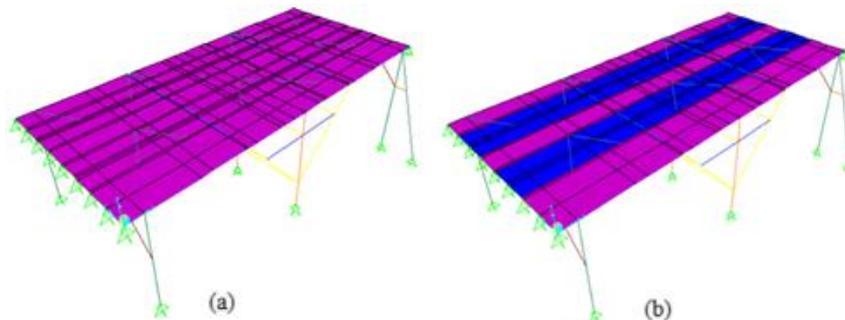
Gambar 10. Hasil Pemodelan (a) Eksisting (b) Baru

Pemodelan struktur kondisi eksisting seperti terlihat pada Gambar 10.a, sementara pemodelan dengan perkuatan dapat dilihat pada Gambar 10.b dengan berat total profil perkuatan adalah 3,0739 Ton dan berat satu pilar portal adalah 0,6828 ton. Dari kedua pemodelan ini bertujuan untuk mengecek struktur apakah sudah memenuhi persyaratan kekuatan dan kekakuan struktur saat diberi beban mencapai 109 Ton. Dari keduanya terlihat perbedaan yang mencolok pada bagian pilar portal, Pemodelan terbaru telah menambahkan pilar portal di tengah jembatan dan penambahan penopang pada pilar portal eksisting. Hal ini bertujuan agar dapat menambah kekuatan dan kekakuan struktur jembatan (Mielczarek and Nowogońska 2021).

digunakan sebagai parameter pemodelan jembatan kondisi eksisting. Berikut adalah Gambar 9 hasil pemodelan jembatan kondisi eksisting dan baru.

Pembebanan

Pembebanan jembatan ini didasarkan pada SNI 1725:2016 Pembebanan untuk jembatan, yang meliputi beban mati dan beban mati tambahan (SDL). Beban mati merupakan berat sendiri struktur jembatan yang dihitung oleh program. Sementara beban mati tambahan (SDL) dihitung berdasarkan berat jenis dan tebal aspal. Untuk beban mati tambahan lainnya adalah dari berat pelat baja yang akan digelar di atas aspal saat kendaraan berat melewati jembatan tersebut seperti terlihat pada Gambar 11 simulasi tersebut. Namun, beban ini hanya diterapkan pada analisis pemodelan terbaru saja.



Gambar 11. Beban mati tambahan (a) Asphalt (b) Pelat Baja Gelar diatas Asphalt

Selanjutnya, beban hidup diaplikasikan berdasarkan berat dari kendaraan berat *axle line* (48 roda) ditambah muatan generator saat semua tapak ban tertumpu di tengah bentang jembatan. Untuk memastikan lendutan pada area terdekat pilar portal,

dilakukan juga model pembebanan hidup dengan mengasumsikan setengah dari *axle line* (24 roda) bertumpu pada ujung bentang jembatan. Adapun nilai beban yang bekerja dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini.

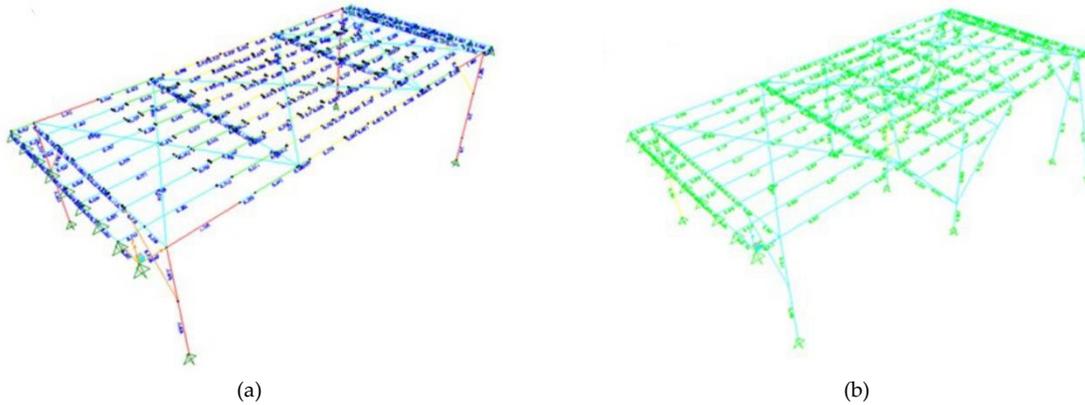
Tabel 6. Hasil Perhitungan Pembebanan

Jenis Beban	Nilai	Satuan
Beban mati (struktur jembatan)	438,385	kN
Beban mati tambahan		
- Perkerasan beraspal	1,98	kN/m ²
- Pelat baja gelar	235,5	Kg/m ³
Beban generator (48 roda -tengah jembatan)	12,11	ton/m ²
Beban generator (24 roda-ujung jembatan)	24,22	ton/m ²

Kendaraan dengan 6 *axle line* melintas melalui jembatan dengan panjang ban dari AS ke AS adalah 7,5 meter serta memikul beban generator mencapai 109 ton. Area warna biru pada Gambar 11 merupakan tapak ban pada jembatan dengan total sebanyak 8 ban pada arah memendek dibuat menjadi 4 ban karena jarak ban yang sangat rapat, serta ada 6 ban pada arah memanjang dengan jarak antarban 1,5 meter.

Kekuatan Struktur

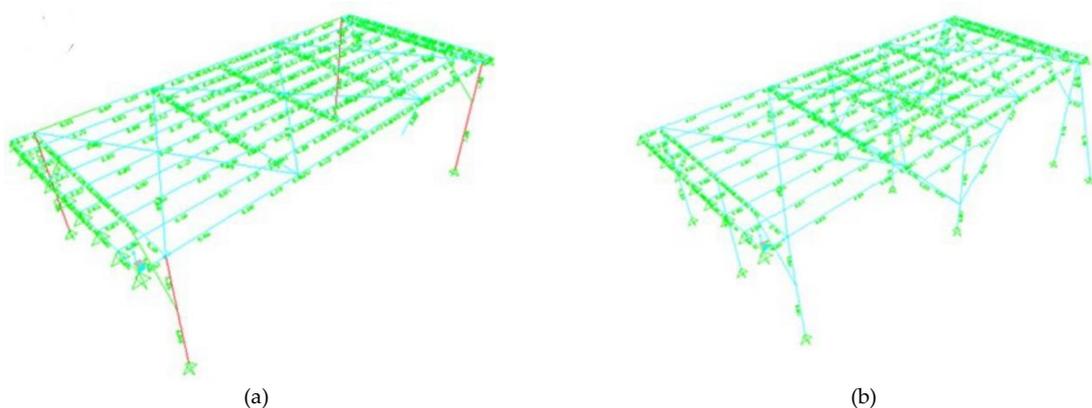
Dalam analisis struktur perlu melakukan analisa rasio kapasitas pada setiap elemen struktur, warna pada elemen struktur menunjukkan rasio penampang batang tersebut. Berikut merupakan rasio kapasitas yang dihasilkan pada setiap elemen struktur seperti terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Rasio Kapasitas Beban Generator-48 roda (a) Eksisting (b) Baru

Merujuk pada data yang disajikan pada Gambar 12.a, dapat disimpulkan bahwa struktur yang dianalisis tidak memenuhi persyaratan kekuatan yang berlaku. Ketidaksiuaian ini ditandai dengan nilai rasio kapasitas maksimum sebesar 3,180 dengan nilai tersebut melebihi batas 1,00 yang merupakan standar keberterimaannya. Rasio kapasitas terbesar ini terdeteksi pada elemen kolom portal eksisting. Kondisi ini disebabkan oleh kombinasi beban ultimit yang terdiri dari 1,2DL + 1,2SDL + 1,8LL. Hasil analisis yang ditampilkan pada Gambar 12.b menunjukkan bahwa

struktur telah memenuhi persyaratan kekuatan yang dipersyaratkan. Hal ini dibuktikan dengan nilai rasio kapasitas maksimum sebesar 0,796 yang berada di bawah batas aman 1,00. Rasio kapasitas terbesar dengan kekuatan 0,796 berada pada kolom portal perkuatan. Untuk rasio kapasitas kolom portal eksisting yang awalnya 3,180 berubah menjadi 0,796. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa struktur memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan beban yang bekerja pada struktur jembatan dan aman untuk digunakan



Gambar 13. Rasio Kapasitas Beban Generator-24 roda (a) Eksisting (b) Baru

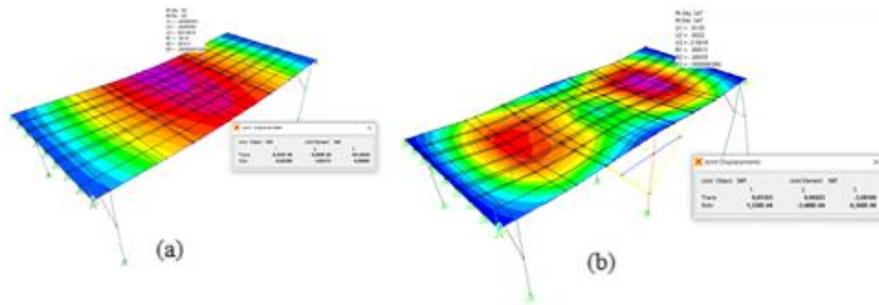
Dapat dilihat dari Gambar 13.a yang menunjukkan rasio kapasitas struktur jembatan ketika 24 roda berada di ujung jembatan. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa struktur tidak memenuhi

persyaratan kekuatan yang dipersyaratkan. Hal ini disebabkan oleh rasio kapasitas maksimum mencapai 1,954, melebihi batas aman yaitu 1,00. Kondisi ini terjadi pada kolom portal eksisting dan disebabkan oleh

kombinasi beban ultimit yang terdiri atas 1,2DL + 1,2 SDL + 1,8 LL. Rasio kapasitas struktur untuk beban generator-24 roda berada pada ujung jembatan, berdasarkan Gambar 13.b dapat disimpulkan bahwa struktur sudah memenuhi persyaratan kekuatan karena memiliki rasio kapasitas kurang dari 1,00 dengan rasio kapasitas maksimum, yaitu $0,772 < 1,00$.

Kekakuan Struktur

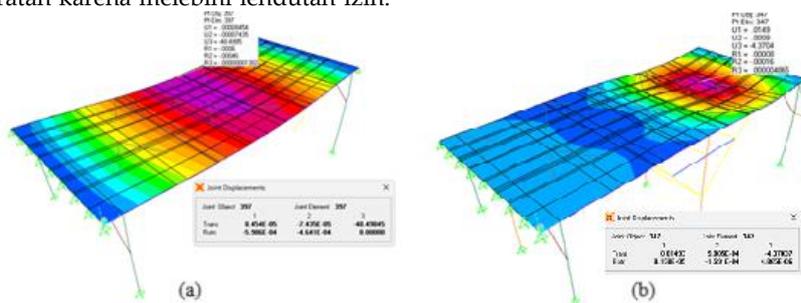
Batasan nilai lendutan yang diizinkan adalah $1/800 \times L$, dan L merupakan panjang bentang jembatan atau sama dengan $L/800$. Dengan demikian, batas nilai lendutan yang diizinkan adalah 15 mm



Gambar 14. Lendutan Maksimum Beban Generator-48 roda (a) Eksisting (b) Baru

Berdasarkan Gambar 14.a, nilai lendutan maksimum yang terjadi sebesar 101,9919 mm. Lendutan maksimum > Lendutan izin yaitu $101,9919 \text{ mm} > 15 \text{ mm}$. Akibat kombinasi ultimit yaitu 1,2DL + 1,2 SDL + 1,8 LL. Lendutan pada kondisi eksisting tidak memenuhi persyaratan karena melebihi lendutan izin.

Sementara itu, berdasarkan Gambar 14.b, nilai lendutan maksimum yang terjadi sebesar 3,582 mm. Lendutan maksimum < Lendutan Izin yaitu $3,582 \text{ mm} < 15 \text{ mm}$ sehingga lendutan pada kondisi perkuatan memenuhi persyaratan karena tidak melebihi lendutan izin.



Gambar 15. Lendutan Maksimum Beban Generator-24 roda (a) Eksisting (b) Baru

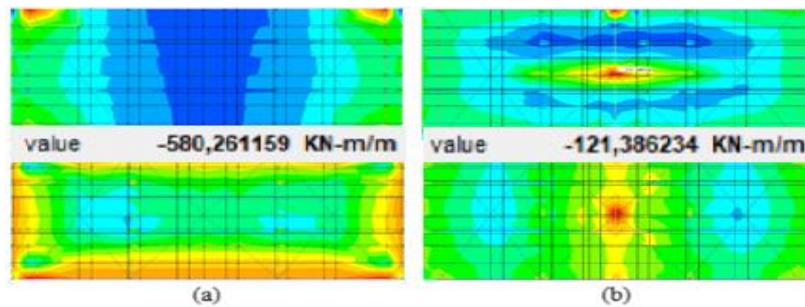
Berdasarkan Gambar 15.a, jembatan dengan beban 24 roda pada ujung jembatan memiliki nilai lendutan maksimum yang terjadi sebesar 48,498 mm.

Lendutan maksimum > Lendutan izin, yaitu $48,498 \text{ mm} > 15 \text{ mm}$. Akibat kombinasi Ultimit yaitu 1,2DL + 1,2 SDL + 1,8 LL. Lendutan pada kondisi eksisting tidak memenuhi persyaratan karena melebihi lendutan izin. Sementara itu, sesuai dengan Gambar 15.b dengan beban 24 roda berada di ujung jembatan memiliki nilai lendutan maksimum sebesar 4,370 mm.

Lendutan maksimum < Lendutan izin yaitu $4,370 \text{ mm} < 15 \text{ mm}$ sehingga pada kondisi perkuatan memenuhi persyaratan karena tidak melebihi lendutan izin.

Momen Pelat Lantai Beton

Berdasarkan Gambar 16.a diperoleh momen maksimum yang terjadi pada pelat beton eksisting adalah sebesar 580,261 kNm, sedangkan untuk momen maksimum pelat lantai baru adalah 121,4 kNm seperti terlihat pada Gambar 16b



Gambar 16. Momen Maksimum Pelat Lantai Beton (a) Eksisting (b) Baru

Dengan adanya keterbatasan data pada software SAP2000, perlu dilakukan bantuan aplikasi lain menggunakan Response2000 untuk mendapatkan nilai kapasitas Mn dan didapatkan hasil sebesar 87 kNm. Sementara itu, hasil sebesar 52 kNm merupakan nilai setelah perkuatan sehingga dapat disimpulkan bahwa pelat lantai beton tidak mampu menahan beban generator yang mencapai 109 Ton.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini memiliki implikasi akademis yang signifikan dalam pengembangan metode perkuatan struktur jembatan, khususnya untuk struktur dengan karakteristik serupa Jembatan Kawah Ijen 2. Studi ini memberikan bukti empiris mengenai efektivitas kombinasi berbagai metode perkuatan seperti pilar portal dan CFRP. Secara praktis, temuan ini sangat relevan bagi pengelola infrastruktur jembatan. Data ini dapat menjadi acuan untuk perencanaan dan implementasi program pemeliharaan atau perkuatan jembatan di masa mendatang, terutama untuk jembatan yang menunjukkan tanda-tanda penurunan kekuatan atau kekakuan.

Penelitian ini menunjukkan hasil positif. Namun, perbandingan dengan studi sebelumnya mengenai perkuatan jembatan dengan kondisi geologis atau beban lalu lintas serupa dapat memperkaya analisis. Ini akan memberikan pemahaman lebih luas tentang kelebihan dan kekurangan metode perkuatan yang digunakan. Metode penelitian ini memiliki kelemahan karena cakupan analisisnya terbatas. Faktor eksternal atau dinamika beban yang kompleks, seperti analisis kelelahan (*fatigue analysis*), belum sepenuhnya dipertimbangkan. Integrasi metode tambahan seperti simulasi numerik canggih (misalnya, finite element analysis dengan model non-linear) atau pemantauan real-time menggunakan *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) akan memberikan gambaran lebih detail tentang kinerja struktur jembatan jangka panjang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil analisis Jembatan Kawah Ijen 2, dapat ditarik kesimpulan. Pertama, kekuatan dari struktur jembatan yang sudah dilakukan perkuatan dievaluasi berdasarkan nilai kapasitas rasio yang dihasilkan, yaitu sebesar 0,796 yang semula memiliki nilai rasio kapasitas sebesar 3,180. Artinya, ada penurunan nilai kapasitas rasio yang signifikan sehingga dinyatakan layak karena ada di bawah batas limit sebesar 1,00.

Kedua, kekakuan struktur jembatan dari nilai lendutan yang terjadi sebesar 101,9 mm. Setelah dilakukan perkuatan, nilai lendutan menjadi 3,582 mm. Perubahan nilai lendutan ini berdampak baik untuk kekakuan struktur jembatan karena nilai lendutan struktur jembatan setelah dilakukan perkuatan kurang dari limit sebesar 15 mm.

Ketiga, dari nilai momen pelat beton maksimum yang dihasilkan sebesar 580,261 kNm, setelah dilakukan perkuatan menjadi 121,4 kNm. Terjadi pengurangan nilai momen maksimum, tetapi masih melebihi batas momen maksimum yang diizinkan sehingga perlu dilakukan perkuatan tambahan.

Perkuatan menggunakan pilar portal penyangga yang ditempatkan ditengah bentang jembatan sangat perlu dilakukan karena dapat menambah kekuatan dan kekakuan yang terjadi sehingga nilai rasio kapasitas dan lendutan di bawah nilai yang diizinkan. Pada bagian pilar portal eksisting juga ditambahkan penyangga kearah samping untuk memperkuat pilar portal eksisting. Perkuatan lainnya adalah dari pemasangan carbon fiber reinforced polymer pada semua lapisan pelat lantai beton. Di bagian atas lantai jembatan juga disematkan pelat baja setebal 50 mm untuk memperluas area distribusi beban kendaraan berat pada struktur jembatan.

Saran

Penulis merekomendasikan analisis komprehensif terhadap metode perkuatan pelat lantai menggunakan CFRP dan monitoring jembatan menggunakan LVDT selama dilalui kendaraan berat,

demikian memastikan integritas struktur jembatan tetap terjaga dan terhindar dari kerusakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya juga penulis sampaikan kepada Ir. Sumargo, M.Sc., Ph.D., atas bimbingan, masukan berharga, dan diskusi konstruktif yang telah sangat membantu dalam pengembangan ide dan penyempurnaan naskah ini. Penulis juga menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Jenderal Achmad Yani atas penyediaan fasilitas dan lingkungan akademik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkader, Eslam Mohammed, Tarek Zayed, and Nour Faris. 2023. "Synthesized Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Defects, Their Non-Destructive Inspection and Analysis Methods: A Systematic Review and Bibliometric Analysis of the Past Three Decades." *Buildings* 13 (3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030800>.
- Anastasiadis, Anthimos. 2021. "Failure of Steel Structures: Rethinking Some of the Aftermaths." *Urbanism. Architecture. Constructions* 12 (2): 155–68.
- Campbell, Leslie E., Robert J. Connor, Julie M. Whitehead, and Glenn A. Washer. 2020. "Benchmark for Evaluating Performance in Visual Inspection of Fatigue Cracking in Steel Bridges." *Journal of Bridge Engineering* 25 (1): 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001507](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001507).
- Chi, Jen Hao, and Peng Chi Peng. 2020. "Study of the Structural Safety Assessment of Steel Bridge Subjected in Post-Fire." *Construction and Building Materials* 247:118587. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118587>.
- Darshakkumar.V.Mehta. 2015. "Application of Non-Destructive Test for Structural Health Monitoring - State of the Art Review." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 04 (03): 105–8. <https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0403017>.
- Ede, A., C. Nwankwo, S. Oyebisi, O. Olofinnade, A. Okeke, and A. Busari. 2019. "Failure Trend of Transport Infrastructure in Developing Nations: Cases of Bridge Collapse in Nigeria." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 640 (1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012102>.
- Garg, Rajeev Kumar, Satish Chandra, and Aman Kumar. 2022. "Analysis of Bridge Failures in India from 1977 to 2017." *Structure and Infrastructure Engineering* 18 (3): 295–312. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1832539>.
- Garnida, Hendra, Muhammad Syukri, and Rosadi Rosadi. 2023. "Nilai Kondisi Jembatan Di Jalan Nasional Dengan Metode Bridge Management System (Bms) Pada Jembatan Wilayah Sumatra Utara." *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi* 6 (1): 116–23. <https://doi.org/10.31004/jutin.v6i1.14540>.
- Ge, Liangfu, Danhui Dan, and Hui Li. 2020. "An Accurate and Robust Monitoring Method of Full-Bridge Traffic Load Distribution Based on YOLO-v3 Machine Vision." *Structural Control and Health Monitoring* 27 (12): 1–20. <https://doi.org/10.1002/stc.2636>.
- Ghulam R, Mirza, and Ujang Ruslan. 2015. "Delamination of Cfrp Multilayers Cfrp on Reinforced Concrete Sub-Scale Beam." *Politeknik Negeri Bandung*, 61–74.
- Heydarinouri, Hossein, Masoud Motavalli, Alain Nussbaumer, and Elyas Ghafoori. 2021. "Development of Mechanical Strengthening System for Bridge Connections Using Prestressed CFRP Rods." *Journal of Structural Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002923](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002923).
- Hong, Seonguk, Sangki Yoon, Jonghyun Kim, Changjong Lee, Seunghun Kim, and Yongtaeg Lee. 2020. "Evaluation of Condition of Concrete Structures Using Ultrasonic Pulse Velocity Method." *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (2). <https://doi.org/10.3390/app10020706>.
- Iskandar, N, and E M Yusup. 2021. "The Evaluation for Accuracy of Non-Destructive Testing (NDT) in Ultrasonic Inspection on Stainless Steel Material by Ultrasonic Testing Thickness Measurement." *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering* 2 (2): 685–92. <http://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/rpmme>.
- Khedmatgozar Dolati, Seyed Saman, Nerma Caluk, Armin Mehrabi, and Seyed Sasan Khedmatgozar Dolati. 2021. "Non-destructive Testing Applications for Steel Bridges." *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (20): 1–34. <https://doi.org/10.3390/app11209757>.
- Kumar Singhal, Arun, Tariqo Gerito, Dilgasa Bedada, and Ofgaha Alemu. 2008. "An Analysis of Micro Finance Institutions (With Respect To Loan Repayment)." *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)* 2 (1): 1192. <https://doi.org/10.35629/5252-45122323>.
- Lanneke Tristanto. n.d. "Getaran Pilar Jembatan Progo."

- Mielczarek, Magdalena, and Beata Nowogońska. 2021. "Technical Problems in the Renovation of Historic Bridges. Case Study – Road Bridge in Cigacice." *Civil and Environmental Engineering Reports* 31 (1): 70–78. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0005>.
- Peachtree, West, Street Nw, Ryan J Sherman, and David C Burney. 2022. "Recommendations For Non Destructive Testing (NDT) of Concrete Components for Performance-Based Specifications Office of Performance-Based Management and Research," no. August.
- Qurishee, Murad Al, Weidong Wu, Babatunde Atolagbe, Said El Said, and Arash Ghasemi. 2019. "Non-Destructive Test Application in Civil Infrastructure." *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2092–2114. www.irjet.net.
- Rathod, Harsh, Scott Debeck, Rishi Gupta, and Brian Chow. 2019. "Applicability of GPR and a Rebar Detector to Obtain Rebar Information of Existing Concrete Structures." *Case Studies in Construction Materials* 11:e00240. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00240>.
- Setiati, N Retno, Elis Kurniawati, Jl A H Nasution, and No Bandung. 2021. "Analisis Perkuatan Bangunan Bawah Jembatan Dengan Rip-Rap (the Strengthening Analysis of Bridge Substructure," 21–33.
- Shubbar, ALI, Zainab Al-khafaji, Mohammed Nasr, and Mayadah Falah. 2020. "Using Non-Destructive Tests for Evaluating Flyover Footbridge: Case Study." *Knowledge-Based Engineering and Sciences* 1 (01): 23–39. <https://doi.org/10.51526/kbes.2020.1.01.23-39>.
- Tan, Ji Shuang, Khalid Elbaz, Zhi Feng Wang, Jack Shui Shen, and Jun Chen. 2020. "Lessons Learnt from Bridge Collapse: A View of Sustainable Management." *Sustainability (Switzerland)* 12 (3): 1–16. <https://doi.org/10.3390/su12031205>.
- Wahyu Nurdiyanto. 2022. "PT Medco Geothermal Segera Eksploitasi Panas Bumi Ijen." *Legacy Indonesia*. 2022. <https://timesindonesia.co.id/ekonomi/406047/pt-medco-geothermal-segera-eksploitasi-panas-bumi-ijen>.
- Zheng, Yuanxun, Shaoqiang Wang, Peng Zhang, Tongxin Xu, and Jingbo Zhuo. 2022. "Application of Nondestructive Testing Technology in Quality Evaluation of Plain Concrete and RC Structures in Bridge Engineering: A Review." *Buildings* 12 (6). <https://doi.org/10.3390/buildings12060843>.