

Pemeriksaan Kelaikan Fungsi Dengan Uji Beban Statik Pada Jembatan Gelagar Komposit

Heri Khoeri*^{1,2}, Panji Nugroho², Wisnu Isvara³

¹ Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta

² PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

³ Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia

e-mail: *¹ heri.khoeri@umj.ac.id, ² kontak@hesa.co.id, wisnu.isvara1@ui.ac.id

Abstract

The service capacity parameter that must be met for bridge safety aspect TS is not exceeding the limit of voltage and deflection during operation, including when maximum loading conditions occur. To determine the behavior of Composite Bridge A30 at Bekambit Underpass Intersection during operation, static loading tests were conducted. The test was carried out with gradually increasing loads up to 60% of the planned load (UDL), and then the load was gradually removed as well. The measured deflection at 60% UDL load is 21.77 mm, which extrapolated to 100% UDL becomes 36.28 mm, still below the remaining installed deflection limit of 72.4 mm according to the specifications of composite girder bridge A30, and also still below the maximum permissible deflection limit of L/800, which is 37.5 mm. In line with this, the addition of stress at UDL100% extrapolated from 60% UDL stress is 161.4 MPa, meaning only 67% of the allowable stress of SM490 230 MPa. The material elasticity during testing showed linear results, with a maximum remaining deflection of 1.14 mm still below the allowable remaining deflection of 7.5 mm. The bridge capacity based on static response parameters is 100.54% of its designed capacity, which is 5.2% higher compared to estimates using dynamic parameters. Therefore, based on the results of static load testing, the bridge can be declared suitable for operation.

Keywords: bridge, deflection, strain, stress, loading test

Abstrak

Parameter daya layan yang harus dipenuhi untuk aspek keamanan jembatan adalah tidak terlampauinya batas tegangan dan batas lendutan pada saat operasional termasuk saat kondisi pembebanan maksimum terjadi. Untuk mengetahui perilaku Jembatan Komposit A30 Persimpangan Underpass Bekambit saat beroperasi dilakukanlah uji pembebanan statik. Uji dilakukan dengan beban bertahap sampai dengan 60% beban terbagi rata rencana (UDL) dan selanjutnya beban dihilangkan pula secara bertahap.. Lendutan terukur pada beban 60% UDL yaitu 21,77 mm yang diekstrapolasi ke 100% UDL menjadi 36.28 mm masih di bawah batas lendutan sisa terpasang yaitu 72,4 mm menurut spesifikasi jembatan gelagar komposit A30 dan juga masih di bawah batas lendutan ijin maksimum L/800 yaitu 37.5 mm. Sejalan dengan itu tegangan pada UDL100% yang diekstrapolasi dari tegangan 60%UDL yaitu 161,4 MPa artinya hanya 67 % dari tegangan ijin SM490 240,9 MPa. Elastisitas material selama pengujian menunjukkan hasil yang linier, dengan lendutan sisa maksimum 1.14 mm masih di bawah lendutan sisa yang diijinkan yaitu 7,5 mm. Kapasitas jembatan berdasarkan parameter respon statik adalah 100,54% dari kapasitas rencananya, prosentase ini lebih besar 5,2% dibandingkan estimasi menggunakan parameter dinamis. Sehingga berdasarkan hasil uji beban statik, jembatan dapat dinyatakan laik untuk difungsikan.

Kata kunci: jembatan, lendutan, regangan, tegangan, uji beban

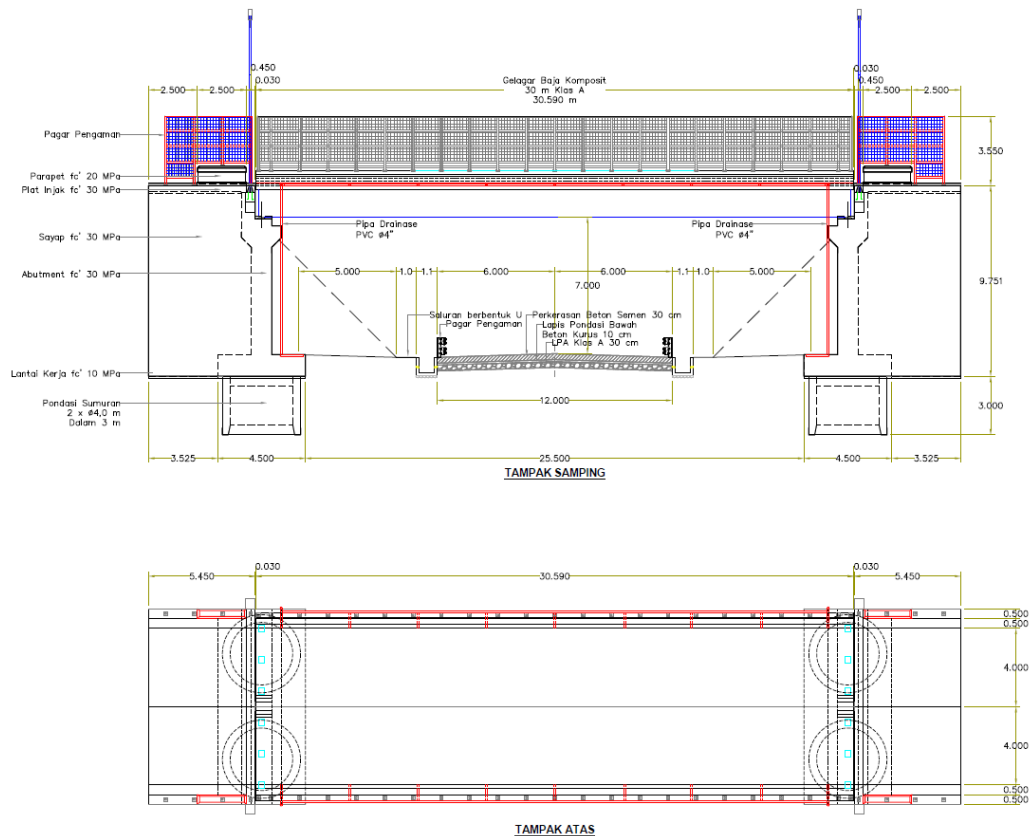
1. Pendahuluan

Jembatan persimpangan underpass bekambit (Gambar 1) adalah jembatan bentang 30 m, lebar 10 m dengan 6 buah girder komposit mengacu pada standard jembatan gelagar komposit A30 yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 1996). Sebelum dilakukan *open traffic* untuk umum, sesuai dengan Spesifikasi untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018), perlu dilakukan uji pembebanan jembatan untuk mengetahui tingkat keselamatan dan menentukan tingkat keamanan konstruksi struktur terhadap beban layan.

Pengujian beban menawarkan cara yang efektif untuk mendapatkan gambaran realistis mengenai respon jembatan. Hasil uji beban memungkinkan verifikasi kelayakan jembatan dan pemeriksaan perhitungan desain. Uji beban juga berfungsi sebagai titik awal yang penting untuk memantau operasi. Terdapat korelasi kuat antara perilaku jembatan saat uji beban dan perilaku jangka panjangnya (Hassan, Burdet, & Favre, 1995).



Gambar 1. Jembatan gelagar komposit A30 Persimpangan Underpass Bekambit



Gambar 2. Denah dan potongan memanjang Jembatan

Sebelum dilakukan *open traffic* perlu dilakukan pengujian untuk menjamin keamanan dan keselamatan pengguna jembatan. Untuk umum. Salah satu metode penilaian untuk jembatan yang sudah ada adalah uji beban (LanTSoght, 2023). Denah dan potongan memanjang jembatan yang akan diuji seperti pada Gambar 2.

Uji beban statis adalah metode deteksi yang umum dan efektif untuk menilai kinerja jembatan, mengetahui keadaan operasional aktual jembatan, dan untuk mengidentifikasi masalah yang ada secara tepat waktu untuk meningkatkan dan mengoptimalkan kualitas jembatan (Tu, Ye, Wu, Zhou, & Deng, 2023), (Li, Liu, Jian, & Gao, 2023). Uji beban juga berfungsi sebagai titik awal yang penting untuk memantau operasi. Terdapat korelasi kuat antara perilaku jembatan saat uji beban dan perilaku jangka panjangnya (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012). Selain uji beban statis, uji beban dapat juga dilakukan dengan uji beban dinamik sebagai pendekatan untuk mendapatkan performa jembatan dalam masa layannya baik dengan *analisis modal operational, OMA* (Khoeri, Alisjahbana, & Nugroho, 2024), ataupun dengan *experimental modal analysis, EMA* (Khoeri, Isvara, Sofiana, & Natasa, 2024). Uji beban statis dianggap lebih mendekati kondisi operasionalnya dibandingkan dengan pendekatan uji beban dinamik (Khoeri, Alisjahbana, Widjajakusuma, & Najid, 2023), namun pada jembatan yang sudah beroperasi tentunya berpotensi mengganggu lalu lintas karena memerlukan penutupan jembatan untuk persiapan beban, pentahapan beban dan pembacaan respon akibat pembebanan. Hasil uji beban dinamik dengan *operational modal analysis (OMA)* pada Jembatan Komposit A30 Persimpangan Underpass Bekambit menyimpulkan berdasarkan parameter dinamik, jembatan dinyatakan laik fungsi, dimana kapasitas aktualnya 100,182% dari kapasitas desainnya (Khoeri, Alisjahbana, et al., 2024). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kelaikan jembatan dari kapasitas jembatan aktual dibandingkan kapasitas desainnya berdasarkan respon statis jembatan terhadap aplikasi pembebanan

yang diterapkan, Mendapatkan hubungan antara kapasitas jembatan berdasarkan respon uji beban statis terhadap kapastias jembatan berdasarkan parameter dinamis.

2. Metode Penelitian

2.1. Parameter Penilaian Uji Beban Statis

Parameter penilaian uji beban statis yaitu:

1. Perpindahan (Lendutan)
2. Tegangan

Lendutan dapat dipertimbangkan sebagai suatu ukuran kekakuan struktural, sedangkan regangan sebagai ukuran kerja bahan. Lendutan akibat beban statis dapat diukur dalam arah horisontal dan vertikal, tetapi arah vertikal umumnya dinyatakan sebagai lendutan struktural, yang dapat diukur menggunakan *dial gage* dan *LVDT (Linear Variable Differential Transformer)* atau teknik pengukuran lain seperti *water pass* atau *total station (TS)*. Lendutan hasil uji biasanya lebih kecil dibanding hasil perhitungan [(Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012), (PT. Hesa Laras Cemerlang, 2019b, 2019a, 2021), (Khoeri, Alisjahbana, et al., 2024) dan lainnya], maka jika hasil uji menunjukkan hal sebaliknya berarti ada indikasi kerusakan struktur.

Salah satu ukuran pokok kualitas struktural adalah perilaku elastis jembatan di bawah siklus *loading* dan *unloading*. Lendutan maksimum yang diijinkan mengacu pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Lendutan maksimum yang diijinkan

Jenis Elemen	Defleksi yang Ditinjau	Defleksi Maksimum yang Diizinkan	
		Beban Kendaraan	Beban Kendaraan +Pejalan Kaki
Bentang sederhana atau menerus	Defleksi seketika akibat beban hidup layan dan beban dampak	L/800	L/1000
Kantilever		L/400	L/375

Sumber : (SNI 1725: 2016, Pembebanan Untuk Jembatan, 2016), (Bridge Design Manual, Vol-1, 1992)

Lendutan permanen ijin maksimum (z_p) dibatasi dengan (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012):

$$z_p < 0.2 z_{max} \quad (1)$$

Dengan z_{max} adalah lendutan ijin maksimum.

Suatu penurunan, sifat elastis menandai adanya beberapa cacat bahan atau kerusakan struktural.

Tegangan umumnya diukur dengan menggunakan dengan teknik elektrik menggunakan *strain gauge* yang menggunakan batasan ketahanan atau kapasitas listrik. Dengan hubungan antara tegangan σ , modulus elastisitas E dan regangan ϵ , maka tegangan dapat dinyatakan sebagai:

$$\sigma < \epsilon E \quad (2)$$

2.2. Tahapan penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan adalah:

1. Tahap uji beban statis
2. Tahap penilaian pemenuhan kriteria uji pembebanan statis (lendutan dan tegangan)
3. Tahap analisis elastisitas dan linearitas aktual jembatan
4. Tahap analisis dan rekomendasi kelaikan fungsi jembatan

Tahap uji beban statis dilakukan dengan kriteria pembebanan sebagai berikut:

- 1) Total beban statis yang diberikan dihitung sedemikian rupa sehingga tidak mengakibatkan kerusakan pada elemen struktur jembatan. Dalam penelitian ini beban yang digunakan adalah 60% beban *Uniform Distribution Load, UDL*. Untuk $L > 30$ m, maka:

$$q = 9 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) kPa \quad (3)$$

$$100\% \text{ UDL} = 9 \left(0,5 + \frac{15}{30,6} \right) = 2181 \text{ kN} \quad (4)$$

$$60\% \text{ UDL} = 1283 \text{ kN} \quad (5)$$

- 2) Beban didistribusikan ke sejumlah titik sehingga mewakili beban lalu lintas yang sebenarnya, menggunakan 4 (empat) buah truk dengan spesifikasi seperti pada Tabel 2 dan Gambar 3 dengan berat truk dan muatan 320 sd. 330 kN. Dokumentasi pengujian seperti pada Gambar 4.

Tabel 2. Dimensi truk yang digunakan

Deskripsi	Dimensi
Jarak Sumbu Roda	5,460 m
Panjang Keseluruhan	8,475 m
Lebar Keseluruhan	2,455 m
Tinggi keseluruhan	2,675 m
Jarak roda depan kiri-kanan	1,925 m
Jarak roda belakang kiri-kanan	1,845 m

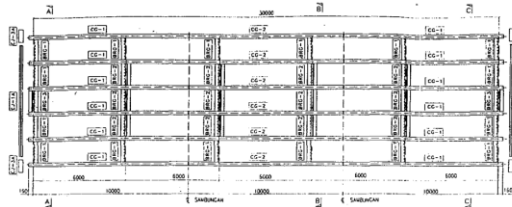


Gambar 3. Dimensi truk yang akan diisi muatan dan digunakan sebagai beban

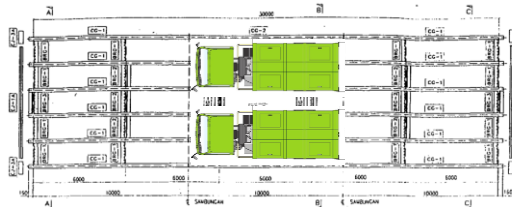
- 3) Beban diberikan secara bertahap, mulai dari tahap *loading* 0%, 30%, 60%, kemudian *unloading* ke 30% dan 0%, dengan skema pembebanan simetris (Gambar 5 sd. Gambar 9).
- 4) Dari tahap beban ke beban berikutnya diberi waktu yang cukup bagi struktur untuk merespon beban.



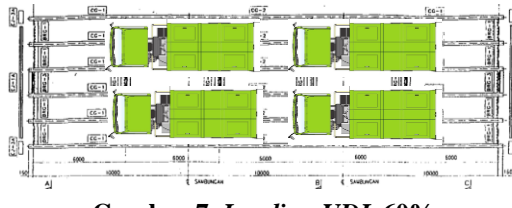
Gambar 4. Dokumentasi pengujian



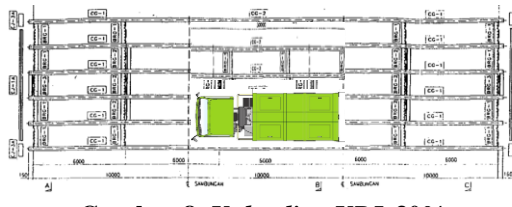
Gambar 5. UDL 0%



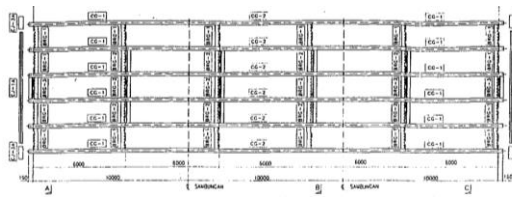
Gambar 6. Loading UDL 30%



Gambar 7. Loading UDL 60%

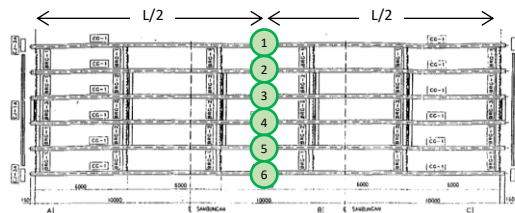


Gambar 8. Unloading UDL 30%

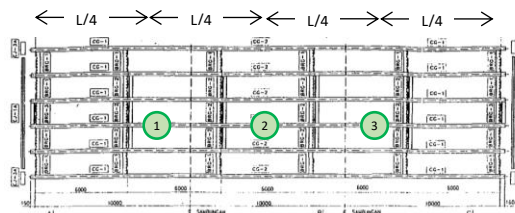


Gambar 9. Unloading UDL 0%

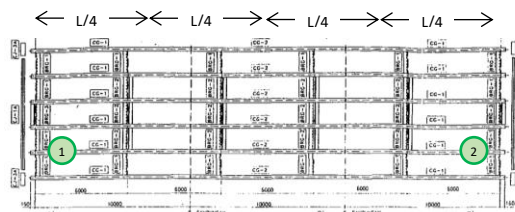
- 5) Sensor dan alat ukur ditempatkan di lokasi yang dapat merepresentasikan kondisi-kondisi kritis (Gambar 10 sd Gambar 12). Selama uji beban seluruh sensor dan alat ukur diamati untuk memantau perilaku struktur, jika tidak linier, maka uji dihentikan.



Gambar 10. Penempatan *strain gauge*



Gambar 11. Penempatan *LVDT dan Dial gauge*



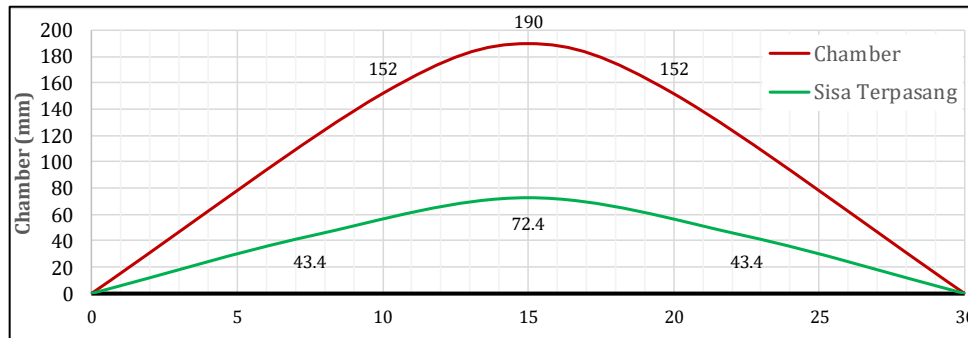
Gambar 12. Penempatan *tilt meter dan inclinometer*

Selama proses pengujian, dilakukan:

- Pengendalian pembebanan: Luas pembebanan dan gaya internal per-bagian harus ditingkatkan secara gradual dari level yang lebih rendah ke level yang lebih tinggi mengikuti prosedur pembebanan yang telah dispesifikasikan, dan selalu siap untuk menghentikan pembebanan atau *unloading* setiap saat, jika ada perilaku tidak linier dari struktur.
- Pengukuran titik pengujian: selama pengujian seluruh titik uji dicatat, direkam, dikalkulasi, dikompilasi dan dianalisis untuk menentukan status pengujian tiap saat. Jika nilai uji jauh di atas analitik, pengujian dihentikan, sebaliknya jika nilai uji jauh di bawah nilai analitik, uji dihentikan sementara untuk memeriksa apakah ada masalah dengan alat ukur/ sensor atau lainnya, dan untuk menentukan pengujian berlanjut atau dihentikan.
- Observasi dalam semua tahap pembebanan: pada saat pelaksanaan, parallel dilakukan observasi khusus pada titik-titik lemah struktur guna memeriksa apakah muncul retakan, kerusakan, bunyi abnormal, getaran abnormal, dan lainnya. Jika terjadi ketidaknormalan, maka pengujian dihentikan sementara untuk menilai ketidaknormalan yang terjadi masih dalam batas toleransi atau tidak.
- Kriteria penghentian pengujian: Pembebanan akan dihentikan jika:
 - Tegangan pada titik pengukuran mencapai atau melebihi nilai kendali yang telah diperhitungkan dengan teori elastik menurut standar desain.
 - lendutan pada titik pengukuran melebihi nilai yang diperkenankan.
 - Distribusi lendutan terukur pada gelagar sangat berbeda dari analitiknya, atau jauh di atas nilai yang analitiknya.
 - Muncul kerusakan yang akan berpengaruh pada penurunan kapasitas layan jembatan.

Tahap penilaian pemenuhan kriteria, lendutan hasil uji yang maksimum dilakukan pada 60% *UDL* diekstrapolasi ke 100% *UDL*, hasilnya dibandingkan dengan lendutan sisa terpasang gelagar

baja komposit A30 (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 1996) dan lendutan ijin maksimum $L/800$ [(SNI 1725: 2016, Pembebanan Untuk Jembatan, 2016), (Bridge Design Manual, Vol-1, 1992)]. Gambar 13 menunjukkan ketentuan *chamber* dan batasan lendutan sisa terpasang.



Gambar 13. Chamber dan lendutan sisa terpasang

Begitupun dengan regangan, dengan pers. (2) nilai tegangan dapat dikalkulasi. Kenaikan tegangan pada pembebanan 60% *UDL* diekstrapolasi ke 100% *UDL*. Selanjutnya nilai kenaikan tersebut dibandingkan dengan tegangan ijin A30 yaitu 230 MPa. Dan mengacu pada Gambar 16 dalam kondisi layan dicadangkan 72.4 mm dari total chamber untuk kondisi operasional, atau bisa diinterpretasikan $72.4/190 = 38\%$ sisa tegangan ijin untuk kondisi operasional.

Tahap analisis elastisitas dan linearitas aktual jembatan, dari grafik hubungan antara lendutan dan tahapan pembebanan, juga dari grafik hubungan antara lendutan dan tahapan pembebanan dapat dilihat elastisitas dan linieritas elemen struktur yang ditinjau.

Tahap analisis dan penyusunan rekomendasi kelaikan fungsi jembatan, berdasarkan tingkat pemenuhan parameter yang diperoleh dari data uji terhadap persyaratan yang ada, disusnlah kesimpulan tingkat kelaikan fungsi jembatan.

3. Hasil Penelitian

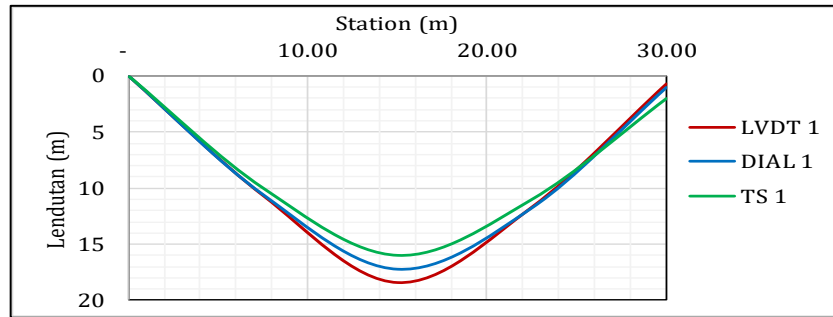
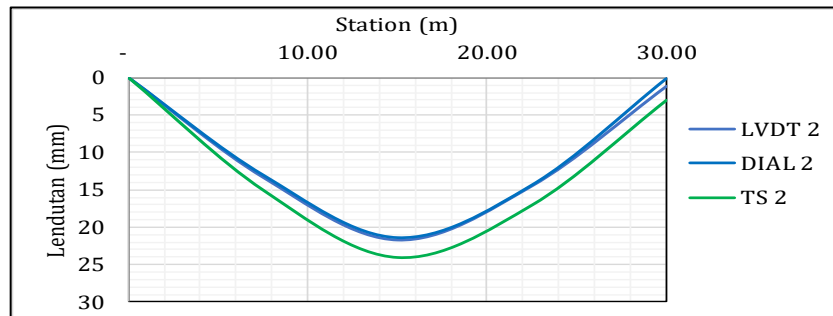
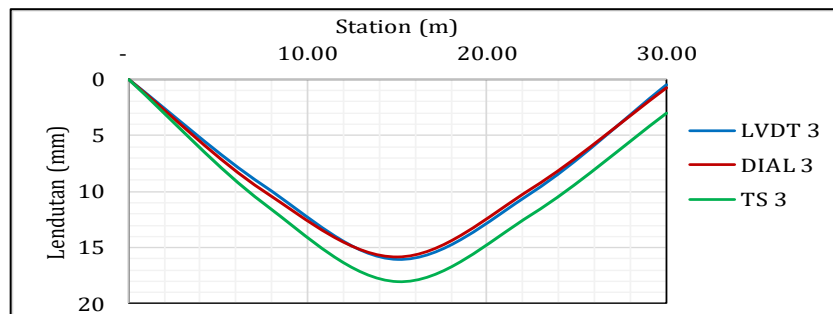
3.1. Pengukuran lendutan

Data hasil pengukuran lendutan seperti diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran lendutan

Lokasi	No. Sensor/ Alat ukur	Lendutan				
		Loading			Unloading	
		0% <i>UDL</i>	30 % <i>UDL</i>	60 % <i>UDL</i>	30 % <i>UDL</i>	0% <i>UDL</i>
Girder 3	<i>LVDT</i> 1	0	10,68	18,46	11,71	0,70
	<i>LVDT</i> 2	0	13,36	21,77	14,50	1,14
	<i>LVDT</i> 3	0	9,43	16,03	10,06	0,47
	<i>DIAL</i> 1	0	10,56	17,19	11,72	1,01
	<i>DIAL</i> 2	0	12,98	21,33	14,30	0,09
	<i>DIAL</i> 3	0	9,90	15,79	9,68	0,74
	<i>TS</i> 1	0	10	16	11	2
	<i>TS</i> 2	0	15	24	17	3
	<i>TS</i> 3	0	11	18	12	3
Girder 4	<i>TS</i> 1	0	10	16	11	2
	<i>TS</i> 2	0	14	23	16	3
	<i>TS</i> 3	0	11	17	12	3

Hasil pada Tabel 3 ditampilkan dalam bentuk grafik untuk posisi $1/4$, $1/2$ dan $3/4$ bentang secara berturut-turut dalam Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 sebagai berikut:

Gambar 14 Lendutan pada $\frac{1}{4}$ bentang girder 3Gambar 15 Lendutan pada $\frac{1}{2}$ bentang girder 4Gambar 16 Lendutan pada $\frac{3}{4}$ bentang girder 5

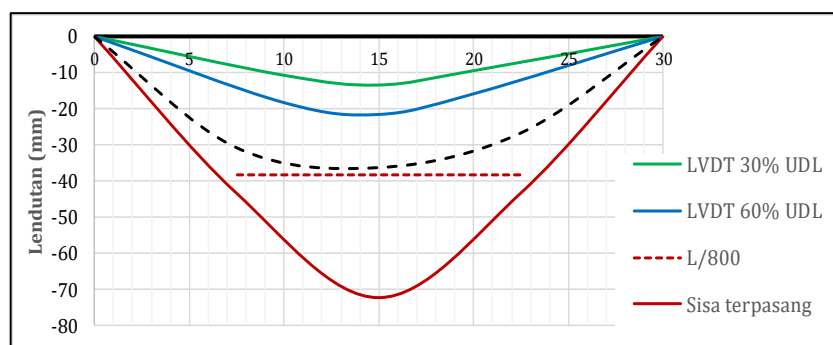
Berdasarkan grafik pada Gambar 20, Gambar 15, Gambar 16 hasil pengukuran lendutan *TS* sedikit menyimpang dari grafik lendutan yang terukur dari *linear variable differential transformer*, *LVDT* dan *Dial gage*, selanjutnya dalam proses analisis tidak mengikutkan hasil pengukuran menggunakan *TS*. *LVDT* yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk Keyence *LVDT GT2 - H50*, dengan rentang pengukuran 50 mm dan resolusi sampai dengan 0,5 μm (Keyence, 2024), tentunya ketelitiannya jauh dibandingkan dengan *TS* dengan ketelitian 1 mm dan *Dial gage* dengan ketelitian 0,1 mm. Untuk keperluan validitas *LVDT* perlu alat ukur yang lebih sederhana untuk memverifikasi pola lendutannya seperti *TS* ataupun *Dial gage* (Hernandez, Myers, John, Myers, & Candidate, 2015; Zarate Garnica, LanTSoght, & Yang, 2022).

Berdasarkan hasil pengukuran lendutan pada 60% *UDL* dilakukan ekstrapolasi untuk lendutan pada beban 100% *UDL*. Selanjutnya nilai tersebut dibandingkan dengan persyaratan lendutan ijin maksimum (SNI 1725: 2016, Pembebanan Untuk Jembatan, 2016), (Bridge Design Manual, Vol-1, 1992), dan lendutan sisa terpasang gelagar baja komposit A30 (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 1996) untuk melihat pemenuhan kriteria lendutan, hasilnya disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 16.

Tabel 4. Pengecekan persyaratan lendutan ijin

No. Sensor/ Alat ukur	Lendutan (mm)			Status
	Estimasi 100% UDL	L/800	Sisa terpasang	
LVDT 1	30,77	< 38,25	43,4	Ok
LVDT 2	36,28	< 38,25	72,4	Ok
LVDT 3	26,72	< 38,25	43,4	Ok
DIAL 1	28,65	< 38,25	43,4	Ok
DIAL 2	35,55	< 38,25	72,4	Ok
DIAL 3	26,32	< 38,25	43,4	Ok

Lendutan estimasi dalam kondisi pembebanan 100% UDL maksimal yang terjadi adalah 36.28 masih dibawah lendutan yang sisa yang dicadangkan dalam spesifikasi A30 yaitu 72.4 mm dan juga masih di bawah lendutan ijin untuk menjamin kenyamanan pengguna jembatan yaitu $L/800 = 38.25$ mm.



Gambar 17. Chamber dan lendutan sisa terpasang

Tabel 5. Pengecekan persyaratan lendutan sisa

No. Sensor/ Alat ukur	Lendutan (mm)			Status
	Ijin maks	Permanen ijin maks.	lendutan sisa	
LVDT 1	38,25	7,65	> 0,70	ok
LVDT 2	38,25	7,65	> 1,14	ok
LVDT 3	38,25	7,65	> 0,47	ok
DIAL 1	38,25	7,65	> 1,01	ok
DIAL 2	38,25	7,65	> 0,09	ok
DIAL 3	38,25	7,65	> 0,74	ok

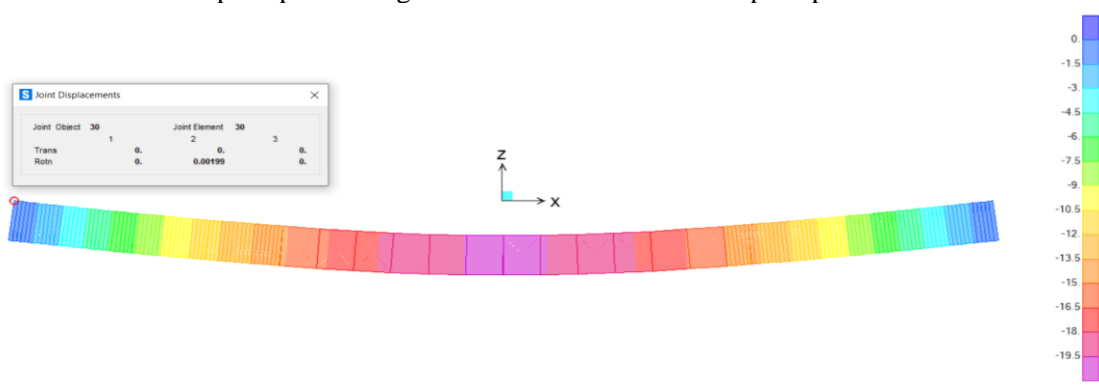
Lendutan sisa aktual lebih kecil dari persyaratan maksimal yang disampaikan dalam pers. (1), artinya struktur dalam kondisi baik dan masih dalam kondis elastis. Selanjutnya, hasil pengukuran rotasi pada tumpuan seperti diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengukuran rotasi pada tumpuan

Sensor	Rotasi (dalam derajat)				
	Loading %UDL		Unloading %UDL		
	0	30	60	30	0
11	0,00	0,08	0,13	0,09	0,02
12	0,00	0,07	0,12	0,07	0,06

Dari Tabel 6 terlihat ketika terjadi pembebanan, tumpuan berotasi, artinya tumpuan berperilaku sebagai pin, bukan sebagai jepit. Untuk melihat apakah benar-benar tidak ada momen yang ditahan oleh tumpuan maka harus dibandingkan dengan perkiraan teoritik rotasi dengan lendutan yang terjadi

pada model *simple beam*. Rotasi yang terjadi pada pembebanan 60% *UDL* ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 18 dan pada perbandingan nilai aktual dan teoritik seperti pada Tabel 7.



Gambar 18 Model rotasi tumpuan pada 60%UDL

Tabel 7. Perbandingan pengukuran rotasi pada tumpuan dan dari pemodelan

Sensor	Rotasi (dalam radian)	
	Nilai aktual saat Loading 60%UDL	Nilai teoritik model dengan 60%UDL
Inclinometer-1	0,002269	0,00199
Inclinometer-2	0,002094	0,00199

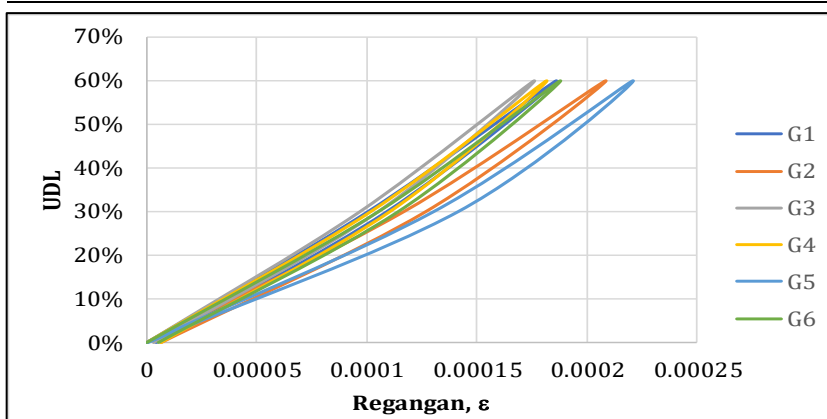
Dari Tabel 7 nilai aktual rotasi yang terjadi lebih besar dari teoritis, mengindikasikan tumpuan berotasi dengan sempurna, tidak ada momen yang ditahan tumpuan, *bearing pad* tumpuan berfungsi dengan baik, di sisi lain, hal tersebut juga menunjukkan bahwa lendutan yang terjadi lebih besar dari teoritisnya. Namun dari pengecekan lendutan, semuanya memenuhi kriteria yang ditetapkan.

3.2. Pengukuran regangan dan tegangan

Data hasil pengukuran regangan seperti diberikan pada Tabel 8 dan Gambar 19.

Tabel 8 Pembacaan sensor regangan

Girder	Pertambahan regangan, $\Delta\epsilon$				
	Loading			Unloading	
	0%	30%UDL	60%UDL	30%UDL	0
1	0	0,000089	0,000186	0,000097	0,000004
2	0	0,000103	0,000208	0,000112	0,000007
3	0	0,000086	0,000176	0,000094	0,000003
4	0	0,000089	0,000182	0,000096	0,000006
5	0	0,000110	0,000221	0,000119	0,000001
6	0	0,000090	0,000188	0,000098	0,000005



Gambar 19 Data regangan pada pembebanan loading 0 sd 60% dan unloading 60% ke 0%

Data uji yang diperoleh adalah regangan, sementara parameter untuk penentuan kelaikan adalah tegangan. Hukum *hooke* menunjukkan adanya hubungan proporsional antara tegangan dan regangan suatu material. Korelasi ini dipakai untuk menentukan tegangan aktual (Novdiansyah, 2019). Dari data regangan, tegangan pada kondisi pembebanan dapat dihitung dengan pers. (1). Penambahan tegangan untuk kondisi 100% *UDL* dapat diperoleh dengan extrapolasi dari beban 60% *UDL*.

Sebelum uji beban, elemen struktur sudah mengalami tegangan akibat berat sendiri, dimana berat sendiri untuk jembatan komposit A30 kelas A adalah 262,4 ton (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2012) ditambah berat aspal 25,2 ton, maka beban mati total, $P_{PM} = 287,6$ ton. Dengan linearitas struktur berdasarkan hukum hooke dari regangan maksimum pada 60% *UDL* (1283 kN = 130 ton) tegangan awal dapat diperkirakan:

$$\frac{P_{PM}}{\varepsilon_{PM}} = \frac{P_{60\%UDL}}{\Delta\varepsilon_{60\%UDL}} \text{ atau } \varepsilon_{PM} = \frac{P_{PM}}{P_{60\%UDL}} \Delta\varepsilon_{60\%UDL} \quad (6)$$

Dengan ε_{PM} = regangan sebelum pembebanan (akibat beban mati), $\Delta\varepsilon_{60\%UDL}$ = pertambahan regangan pada 60% *UDL*, P_{PM} = total beban mati, dan $P_{60\%UDL}$ = beban 60% *UDL*, maka:

$$\varepsilon_{PM} = \frac{287,6}{130} 0,000119 = 0,000263 \quad (7)$$

Selanjutnya regangan aktual yang terjadi pada 60% *UDL* dapat dihitung dengan pers. (8):

$$\varepsilon = \varepsilon_{PM} + \Delta\varepsilon_{UDL} \quad (8)$$

Tabel 9. Sifat mekanis SM 490 (Krakatau Steel, 2010).

No	Deskripsi	Nilai minimum
1	Kuat Tarik (<i>tensile strength</i> , F_t)	490 MPa
2	Kuat Leleh, (<i>Yield strength</i> , F_y)	365 MPa
3	<i>Elongation</i>	19%
4	Kekerasan (<i>Hardness</i>)	27 HRB
5	Modulus elastisitas	200.000 MPa

Tegangan izin maksimum akibat beban siklus puncak harus 0,66 F_y (BSN, 2020):

$$F_a = 0,66F_y \quad (9)$$

dimana F_a adalah tegangan ijin dan F_y adalah tegangan leleh. Maka untuk SM 490 berdasarkan sifat mekanis pada Tabel 9, tegangan ijinnya dapat dinyatakan:

$$F_a = 0,66 \times 365 = 240 \text{ MPa} \quad (10)$$

Dengan menggunakan hubungan tegangan-regangan pers. (1), maka pers. (8) dapat dituliskan dalam bentuk tegangan untuk menyatakan tegangan aktual yang terjadi seperti pada pers. (11):

$$\sigma = \sigma_{PM} + \Delta\sigma_{UDL} \quad (11)$$

Selanjutnya dengan mensubstitusikan hasil pengujian (Tabel 8) ke pers. (8) diperoleh regangan dan ke pers. (11) diperoleh tegangan, dengan linieritas material nilai tegangan dan regangan dapat

diextrapolasi ke 100% *UDL* untuk melihat apakah tegangan yang terjadi masih di bawah tegangan ijinnya, seperti diberikan pada Tabel 10.

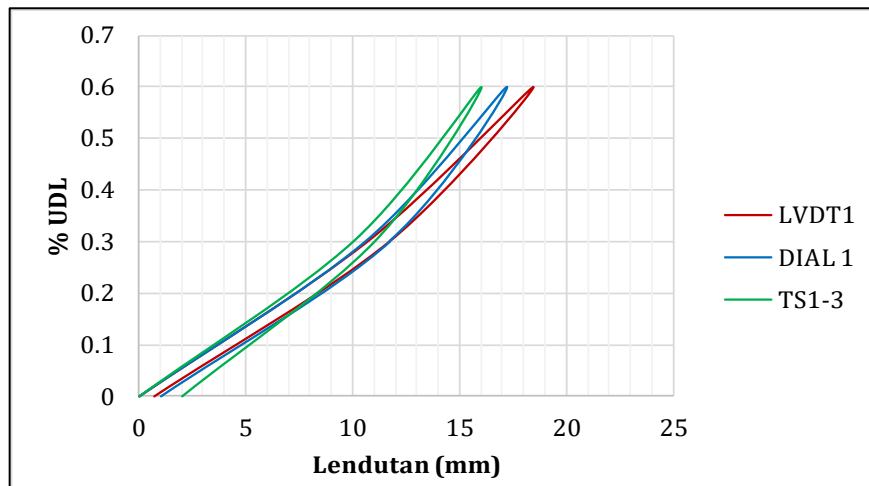
Tabel 10. Pengecekan pemenuhan kriteria tegangan ijin

Girder	60% <i>UDL</i>			σ (MPa)	$\sigma_{100\%UDL}$ (MPa)	F_a (MPa)	Rasio tegangan
	ϵ_{PM}	$\Delta\epsilon$	ϵ				
1	0,000263	0,000186	0,000449	89,85	149,8	< 240,9	62,2%
2	0,000263	0,000208	0,000471	94,25	157,1	< 240,9	65,2%
3	0,000263	0,000176	0,000439	87,85	146,4	< 240,9	60,8%
4	0,000263	0,000182	0,000445	89,05	148,4	< 240,9	61,6%
5	0,000263	0,000221	0,000484	96,85	161,4	< 240,9	67,0%
6	0,000263	0,000188	0,000451	90,25	150,4	< 240,9	62,4%

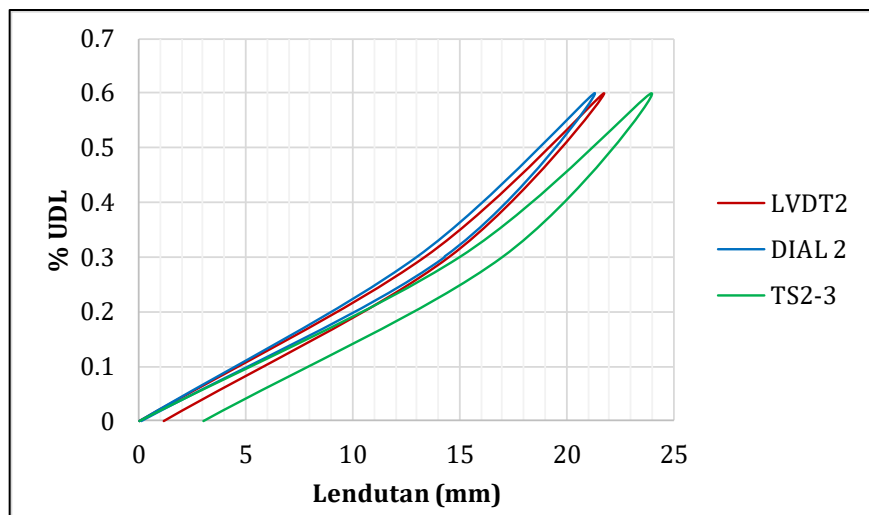
Tegangan maksimum yang terjadi 67% dari tegangan ijin SM490, menunjukkan struktur jembatan dalam batas aman saat beban rencana maksimal bekerja pada jembatan.

3.3. Linieritas Elastisitas Struktur

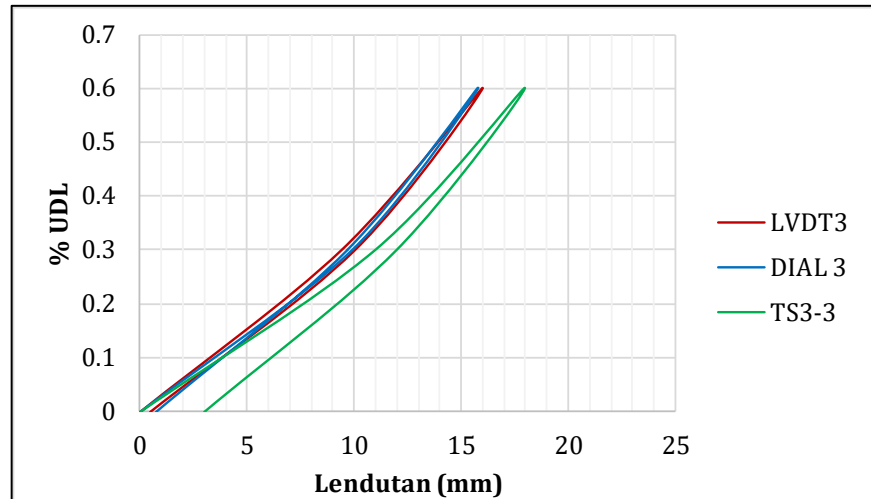
Grafik hubungan penambahan-pengurangan beban (*loading-unloading*) dengan lendutan untuk posisi $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang pada girder 4 diberikan pada Gambar 20, Gambar 21 dan Gambar 22.



Gambar 20. Hubungan lendutan dan %UDL LVDT1, Dial1 dan TS1-3



Gambar 21. Hubungan lendutan dan %UDL LVDT2, Dial2 dan TS2



Gambar 22. Hubungan lendutan dan %UDL LVDT3, Dial3 dan TS3

Berdasarkan Gambar 20, Gambar 21, dan Gambar 22 tahap, pada penambahan beban terlihat penambahan lendutan tidak linear, rasio penambahan lendutan yang terjadi relatif lebih kecil dari rasio penambahan beban, dimana dengan penambahan beban 2 kali lendutan yang terjadi kurang dari 2 kalinya, hal ini karena aktualnya penambahan beban truk tidak seideal penambahan beban terpusat di tengah bentang.

Namun dengan melihat pada kondisi *unloading* lendutan sisa yang terukur masih dalam batas yang diijinkan. (Selanjutnya dengan mensubstitusikan hasil pengujian (Tabel 8) ke pers. (8) diperoleh regangan dan ke pers. (11) diperoleh tegangan, dengan linieritas material nilai tegangan dan regangan dapat diekstrapolasi ke 100% UDL untuk melihat apakah tegangan yang terjadi masih di bawah tegangan ijinnya, seperti diberikan pada Tabel 10.

Tabel 10), maka dapat dinyatakan bahwa elastisitas struktur jembatan dalam kondisi linier elastis pada saat pembebanan. Hal yang sama terlihat pada data regangan, grafik hubungan beban (dalam %UDL) seperti diberikan pada Gambar 19.

3.4. Penilaian Kelaikan berdasarkan Parameter Respon Statik dan Dinamik

Berdasarkan penelitian sebelumnya, berdasarkan penilaian parameter dinamik, kapasitas jembatan Komposit A30 Persimpangan Underpass Bekambit teridentifikasi 100,182% dari kapasitas desainnya (Khoeri, Alisjahbana, et al., 2024). Dimana penurunan dari kapasitas desainnya dapat dinyatakan dengan (Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2002):

$$D_{kap} = \frac{(EI_{teoritis} - EI_{aktual})}{EI_{teoritis}} \times 100\% \quad (12)$$

Dimana D_{kap} = nilai penurunan kapasitas, $EI_{teoritis}$ = kekakuan lentur teoritis [kN.m^2], dan EI_{aktual} = kekakuan lentur aktual [kN.m^2]. Lendutan vertikal dalam *simple beam* akibat beban merata dapat dinyatakan dengan (Derucher, Putcha, Kim, & GangaRao, 2022):

$$\delta = \frac{384qL^4}{384EI} \quad (13)$$

Dimana δ adalah lendutan, q adalah beban terbagi rata, L adalah Panjang bentang, E adalah modulus elastisitas dan I adalah inersia penampang, maka dengan mensubstitusikan EI dari pers. (13) ke dalam pers. (12), penurunan kapasitas jembatan relative terhadap kapasitas ijin rencananya dapat dihitung dengan pers. (14), sebagai berikut:

$$D_{kap} = \frac{\frac{1}{\delta_{ijin}} - \frac{1}{\delta_{aktual}}}{\frac{1}{\delta_{ijin}}} \times 100\% = \left(1 - \frac{\delta_{ijin}}{\delta_{aktual}}\right) \times 100\% \quad (14)$$

Dimana $\delta_{aktual} = 36,28$ mm (lihat Tabel 4 *LVDT-2*), $\delta_{ijin} = \frac{L}{800} = 38,25$ mm, maka $D_{kap} = -5,43\%$ atau dapat dinyatakan kapasitas aktual jembatan adalah 105,43% dari kapasitas rencananya.

4. Kesimpulan

Lendutan terukur pada 60% *UDL* yaitu 21,77 mm yang diekstrapolasi ke 100% *UDL* menjadi 36,28 mm masih di bawah batas lendutan sisa terpasang yaitu 72,4 mm dan masih di bawah batas lendutan ijin maksimum $L/800$ yaitu 37,5 mm, artinya saat beban maksimum terjadi, struktur masih dalam batas nyaman. Tegangan pada *UDL* 100% yang diekstrapolasi dari 60% *UDL* yaitu 161,4 MPa masih 67% dari tegangan ijin SM490 yaitu 240,9 MPa, hal ini menunjukkan pada saat beban maksimum terjadi, jembatan masih dalam kondisi aman. Elastisitas material selama pengujian menunjukkan linieritasnya, dengan lendutan sisa maksimum 1.14 mm yang masih di bawah lendutan sisa ijin yaitu 7.5 mm. Dengan nilai tersebut diperkirakan saat kondisi pembebanan maksimum, struktur masih berperilaku elastis. Kapasitas jembatan aktual berdasarkan parameter respon statis maksimum yang terukur adalah 105.43% dari kapasitas rencananya. Estimasi ini 5,2% lebih besar dibanding estimasi dari parameter dinamis yang estimasinya adalah 100.18%. Berdasarkan parameter respon statis dari lendutan, tegangan dan elastisitas jembatan, maka jembatan dinyatakan laik untuk difungsikan,

Walaupun tegangan aktual yang terjadi 67% dari ijinnya yang artinya struktur dalam kondisi aman, tetapi lendutan aktual saat beban maksimum sudah mendekati ijinnya dan hal ini akan mempengaruhi kenyamanan pengguna jika batas ijin terlampaui. Sehingga untuk memastikan kenyamanan dan keamanan dalam masa operasional, secara berkala perlu dilakukan pemeriksaan kapasitas beban, baik dengan uji beban statik ataupun dinamik, dengan bench mark dari uji beban sebelumnya.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>, yang telah mendukung penuh peralatan dan teknisi pengujian dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. SNI 1725: 2016, Pembebanan untuk Jembatan, Pub. L. No. SNI 1725:2016 (2016).
- BSN. (2020). *SNI 1729: 2020; Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*.
- Derucher, K., Putcha, C., Kim, U., & GangaRao, H. V. S. (2022). *Static Analysis of Determinate and Indeterminate Structures*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=UUtWEAAAQBAJ>
- Directorate General of Highways Ministry of Public Works Republic of Indonesia. Bridge Design Manual, Vol-1 (1992).
- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (1996). *Panduan Perakitan dan Pemasangan Jembatan Gelagar Baja Komposit Bentang 20 m sampai dengan 30 m*. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (2002). *Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar. Pt T-05-2002-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Manual Pelaksanaan Pengujian Jembatan, Pub. L. No. 004/BM/2012 (2012).

- Hassan, M., Burdet, O., & Favre, R. (1995). *Analysis and Evaluation of Bridge Behavior Under Static Load Testing Leading to Better Design and Judgment Criteria*. In *Fourth International Bridge Engineering Conference* (pp. 296–303).
- Hernandez, E. S., Myers, J. J., John, P., Myers, J., & Candidate, P. (2015). In-Situ Field Test and Service Response of Missouri Bridge A7957. doi:10.13140/RG.2.1.2921.8005
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga. Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2), Pub. L. No. Surat Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 16.1/SE/Db/2020 (2018).
- Keyence. (2024). *Spesifikasi GT2-H50*. Jakarta. Retrieved from <https://www.keyence.co.id>
- Khoeri, H., Alisjahbana, S. W., & Nugroho, P. (2024). Uji Beban Dinamik dan Analisis Modal Operasional Jembatan Baja Komposit Underpass Bekambit. *Dinamika Rekayasa*, 20(1), 65–75. doi:10.20884/1.dinarek.2024.20.1.20
- Khoeri, H., Alisjahbana, S. W., Widjajakusuma, J., & Najid, N. (2023). Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar. *Konstruksia*, 14(2), 175–188. doi:10.24853/jk.14.2.175-188
- Khoeri, H., Isvara, W., Sofiana, D., & Natasa, F. (2024). Penilaian Kelaikan Jembatan Berdasarkan Parameter Dinamis Experimental pada Jembatan PC-I Girder 40 m. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*.
- Krakatau Steel. (2010). *Spesification Product*. Retrieved from <https://www.krakatausteel.com/pdf/product%20spec%20untuk%20web.pdf>
- LanTSoght, E. O. L. (2023). Assessment of existing concrete bridges by load testing: barriers to code implementation and proposed solutions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–13. doi:10.1080/15732479.2023.2264825
- Li, B., Liu, H., Jian, J., & Gao, H. (2023). Static Load Test Analysis of T-Beam Bridge Shear Strengthening by Prestressed Steel Wire Rope Embedded in Polyurethane Cement (PSWR-PUC). *Sustainability*, 15(13), 10514. doi:10.3390/su151310514
- Novdiansyah, D. (2019). *Pengujian Beban Statik dan Analisa Kapasitas Sisa Struktur pada Jembatan Melengo Kabupaten Siak*. Universitas Islam Riau, Pekanbaru.
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2019a). *Laporan Akhir Pengujian Jembatan Tri Martani PT. Borneo Indobara di Kalimantan Selatan*. Retrieved from <https://hesa.co.id>
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2019b). *Laporan Uji beban Statik dan Dinamik Fly Over Tarahan, Lampung*. Retrieved from <https://hesa.co.id>
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2021). *Laporan Uji Statik dan Dinamik 4 (Empat) Jembatan PT. Hindoli-Cargill di Provinsi Jambi*. Retrieved from <https://hesa.co.id>
- Tu, K., Ye, Y., Wu, D., Zhou, Y., & Deng, W. (2023). Technical Analysis of Highway Bridge Static Load Test. *Journal of Architectural Research and Development*, 7(3), 58–63. doi:10.26689/jard.v7i3.4829
- Zarate Garnica, G. I., LanTSoght, E. O. L., & Yang, Y. (2022). Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(10–11), 1558–1580. doi:10.1080/15732479.2022.2063906