

PENENTUAN NILAI DEFLEKSI MAKSIMUM PADA JEMBATAN STEEL BOX GIRDER BERDASARKAN DATA NILAI ROTASI

David Surachmat¹, Made Suangga²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara Jakarta

Email: davids.deca@gmail.com

² Departemen Sipil, Universitas Tarumanagara Jakarta

Email: suangga@binus.edu

Masuk: 09-02-2021, revisi: 26-09-2021, diterima untuk diterbitkan: 06-10-2021

ABSTRAK

Pemantauan kesehatan struktur jembatan (*structural health monitoring system*) sangat penting dilakukan untuk memastikan jembatan tetap dalam kondisi yang memadai. Banyak cara yang dapat dilakukan untuk memonitor kondisi jembatan, salah satunya dengan menggunakan *Global Positioning System* (GPS). Walaupun menghasilkan data yang akurat, penggunaan GPS dipandang menghabiskan biaya yang relatif besar. Adapun solusi yang lebih praktis dan murah untuk memprediksi defleksi yaitu dengan menggunakan *tiltmeter* dengan data rotasi. Pada studi ini, telah dipelajari tingkat akurasi defleksi jembatan *steel box girder* dengan bentang sederhana dari hasil persamaan regresi dengan data rotasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa model regresi linear dan kuadratik 3D untuk 2 data rotasi memiliki tingkat akurasi lebih baik jika dibandingkan dengan model regresi linear dan kuadratik 2D untuk 2 data rotasi.

Kata Kunci: defleksi; rotasi; *structural health monitoring system*; *tiltmeter*

ABSTRACT

Structural health monitoring system plays a crucial role in order to ensure a well-maintained bridge condition. There are a number of methods that may be utilized in order to conduct the monitoring process, namely the use of Global Positioning System (GPS). Despite its accuracy, the use of GPS is deemed costly. A more practical and economical approach to predicting deflection is the use of tiltmeter to obtain rotational values. This research studied the accuracy of simple span steel box girder deflection that is obtained from regression formulae. The analysis showed that a 3D linear and quadratic regression with two rotation data provided the best accuracy if compared with 2D.

Keywords: *deflection; rotation; structural health monitoring system; tiltmeter*

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan suatu konstruksi penghubung antarsungai, jalan dan rintangan fisik lainnya. Untuk memastikan bahwa jembatan selalu berada dalam kondisi baik diperlukan suatu upaya untuk memonitor kondisi struktur jembatan yang disebut sistem pemantauan kesehatan struktur atau *structural health monitoring systems*. Beberapa dekade terakhir dilakukan penerapan sistem yang berbasis komputer agar informasi kesehatan struktur diperoleh tepat waktu, berkelanjutan dan ekonomis (Brownjohn, 2006).

Secara umum, pemantauan kesehatan struktur bertujuan untuk mendeteksi kerusakan struktur, memprediksi umur layan struktur, dan menyediakan data agar proses pemeliharaan seoptimal mungkin dari segi biaya (Liu, 2009).

Defleksi vertikal merupakan parameter yang sangat penting untuk dimonitor dengan tujuan untuk memastikan jembatan tetap dalam kondisi yang memadai. pengukuran defleksi jembatan seringkali tidak mudah bahkan tidak dimungkinkan karena kondisi fisik atau iklim. Upaya untuk mengukur defleksi pada jembatan telah dilakukan yaitu dengan menerapkan teknologi GPS (Ozakgul dkk, 2009). Penerapan GPS dirasa mahal, oleh sebab itu perlu adanya alternatif untuk menentukan defleksi pada jembatan. Penempatan *tiltmeter* ataupun *strain gauge* merupakan upaya pendekatan yang cepat untuk memonitor defleksi (Sousa dkk., 2013).

Zhang dkk. (2006) meneliti tentang estimasi defleksi jembatan melalui data inklinometer pada jembatan *cable-stayed* dengan mempertimbangkan kerusakan struktural. Hasil penelitian Zhang dkk. menunjukkan bahwa perkiraan defleksi sangat akurat dengan perbedaan 0%.

Penuntun dkk. (2019) meneliti tentang defleksi pada jembatan Soekarno dengan jenis jembatan *cable-stayed*. Hasil penelitian Penuntun dkk. menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode pendekatan *Lagrange Interpolation Half* dengan 24 *tiltmeter* memberikan hasil yang sangat baik dengan perbedaan defleksi maksimum hanya sebesar 1,056 mm dan dengan rata-rata perbedaan 0,722 mm.

Tiltmeter merupakan solusi yang lebih praktis dan murah untuk memprediksi defleksi dengan menggunakan data rotasi. Dari permasalahan tersebut penting untuk mengetahui korelasi defleksi dari data rotasi (Haripriambodo, 2019).

Tujuan penelitian

Dalam studi ini akan dibahas persamaan korelasi defleksi dari data rotasi pada jembatan steel box girder bentang sederhana dengan mengusulkan metode baru yang lebih sederhana, praktis dan berbiaya rendah untuk mengukur defleksi jembatan dengan data rotasi. Selain itu memberikan informasi tingkat keakuratan analisis dua dimensi dibandingkan dengan tiga dimensi dalam memperkirakan defleksi berdasarkan rotasi.

2. METODE PENELITIAN

Prosedur analisis

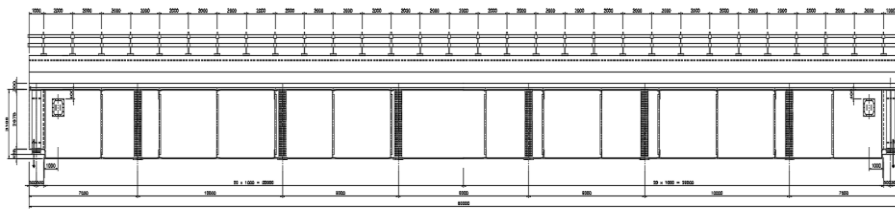
Prosedur analisis dapat dijabarkan sebaga berikut:

- a. Melakukan pemodelan struktur dan masukan variasi beban pada jembatan *steel box girder* bentang sederhana dengan panjang bentang 60 m untuk kasus 2D dan 3D menggunakan perangkat lunak FEM.
- b. Melakukan analisis regresi linear dan kuadratik dengan perangkat lunak statistika berdasarkan data defleksi dan rotasi keluaran perangkat lunak FEM untuk mendapatkan persamaan regresi kasus 2D dan 3D.
- c. Memeriksa tingkat akurasi defleksi maksimum dengan memasukan nilai rotasi pada persamaan terhadap hasil FEM untuk kasus 2D dan 3D.
- d. Membandingkan tingkat akurasi persamaan 2D dan 3D.

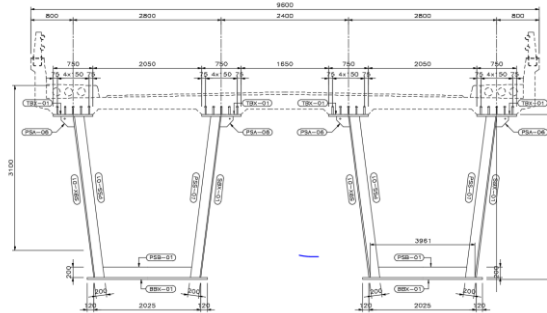
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data jembatan

Pada penelitian ini jembatan yang digunakan ialah *steel box girder* dengan panjang 60 m dan jenis bentang merupakan bentang sederhana. Potongan memanjang dan melintang pada jembatan yang akan diteliti dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2, sedangkan spesifikasi teknis pada jembatan ini dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Potongan memanjang jembatan



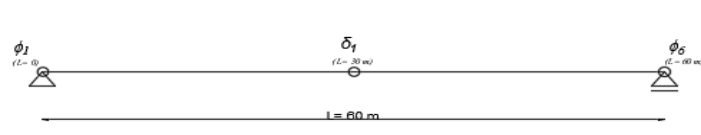
Gambar 2. Potongan melintang jembatan

Tabel 1. Spesifikasi teknis jembatan

Modulus elastisitas (MPa)	200000
Jenis baja	SM 490
Kuat leleh minimum (MPa)	360
Kuat putus minimum (MPa)	490
Poisson Ratio	0,3

Lokasi pengambilan data

Tiap-tiap posisi pengukuran defleksi dan rotasi pada analisis 2 dimensi dan 3 dimensi memiliki jumlah data rotasi sebanyak 2 data rotasi dan defleksi sebanyak 1 data. Gambar 3 menunjukkan posisi pengukuran defleksi dan rotasi pada tesis ini.



Gambar 3. Posisi pengukuran defleksi dan 2 data rotasi pada tumpuan kasus 2D dan 3D

Analisis 2D dan 3D

Analisis 2D

Pada analisis 2D jembatan dimodelkan dengan menggunakan 1 girder. Pemodelan struktur 2D pada perangkat lunak FEM dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan struktur 2D

Terdapat 20 posisi beban pada analisis 2D yang dimasukan. Posisi beban 2D dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Posisi beban 2D

Posisi beban	Load Configuration	No	Load Configuration
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	
13		14	
15		16	
17		18	
19		20	

Hasil analisis dua dimensi berupa data nilai defleksi dan data rotasi yang kemudian diolah dengan menggunakan perangkat lunak statistika sehingga didapatkan persamaan regresi. Hasil FEM dan persamaan regresi dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil FEM 2D

Posisi Beban	δ (mm)	Φ_1 (Rad)	Φ_2 (Rad)
	(L=30m)	(L=0m)	(L=60m)
PB1	-124.2	0.00641	-0.00641
PB2	-62.1	0.00361	-0.0028
PB3	-1242.4	0.06411	-0.06411
PB4	-621.2	0.02805	-0.03606
PB5	-310.6	0.01803	-0.01402
PB6	-248.5	0.01282	-0.01282
PB7	-621.2	0.03206	-0.03206
PB8	-124.2	0.00721	-0.00561
PB9	-310.6	0.01402	-0.01803
PB10	-621.2	0.03606	-0.02805
PB11	-62.1	0.0028	-0.00361
PB12	-124.2	0.0056	-0.00721
PB13	-25.6075	0.0015	-0.00114
PB14	-12.8037	0.00075	-0.00057
PB15	-26.9788	0.00155	-0.00121
PB16	-26.9788	0.00121	-0.00155
PB17	-11.5211	0.00051	-0.0007
PB18	-18.8852	0.00108	-0.00084
PB19	-23.0422	0.00102	-0.0014
PB20	-18.8852	0.00084	-0.00108

Keterangan:

δ = Lendutan

Φ = Putaran sudut

Tabel 4. Persamaan regresi linear dan kuadratik dua dimensi

Jumlah Data Rotasi	Persamaan Regresi Linear
2 ($L = 0$ dan $L = 60m$)	$\delta = 0,042 - 9689,276 \phi_1 + 9688,667 \phi_2$
Jumlah Data Rotasi	Persamaan Regresi Kuadratik
2 ($L = 0$ dan $L = 60 m$)	$\delta = -0,054 - 9693,393 \phi_1 + 9680,985 \phi_2 - 1525,59 \phi_1 \phi_2 - 686,299 \phi_1^2 - 898,121 \phi_2^2$

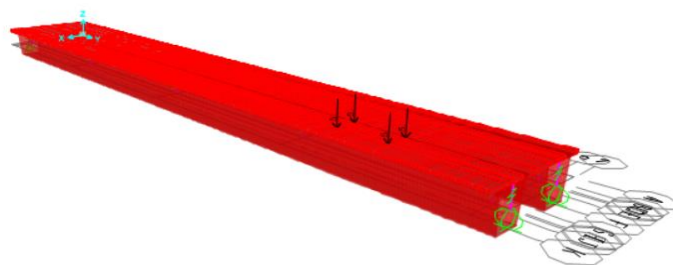
Perbedaan defleksi hasil FEM dibandingkan dengan defleksi hasil regresi untuk kasus 2D dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Defleksi FEM vs defleksi regresi 2D

Posisi Beban	δ FEM (mm)	Linear			Kuadratik		
		δ Regresi (mm)	Perbedaan Lendutan (mm)	Persentase Perbedaan (%)	δ Regresi (mm)	Perbedaan Lendutan (mm)	Persentase Perbedaan (%)
PB1	-124.2	-124.254	0.054408	0.043807	-124.247	0.046509	0.037447
PB2	-62.1	-62.1483	0.048348	0.077855	-62.1548	0.054798	0.088242
PB3	-1242.4	-1242.36	0.038281	0.003081	-1242.39	0.012463	0.001003
PB4	-621.2	-621.199	0.000685	0.00011	-621.215	0.015059	0.002424
PB5	-310.6	-310.575	0.025448	0.008193	-310.568	0.032382	0.010425
PB6	-248.5	-248.467	0.032977	0.013271	-248.444	0.056473	0.022725
PB7	-621.2	-621.299	0.098646	0.01588	-621.257	0.057372	0.009236
PB8	-124.2	-124.255	0.054896	0.0442	-124.256	0.056253	0.045292
PB9	-310.6	-310.572	0.027892	0.00898	-310.545	0.054915	0.01768
PB10	-621.2	-621.204	0.004198	0.000676	-621.206	0.005672	0.000913
PB11	-62.1	-62.1479	0.047854	0.077059	-62.1458	0.045847	0.073828
PB12	-124.2	-124.157	0.042972	0.034599	-124.144	0.056156	0.045214
PB13	-25.6075	-25.6208	0.013288	0.051891	-25.6308	0.023341	0.091148
PB14	-12.8037	-12.8313	0.027591	0.215491	-12.8426	0.038857	0.303483
PB15	-26.9788	-26.7835	0.195341	0.724055	-26.7932	0.185621	0.688025
PB16	-26.9788	-26.7833	0.195549	0.724824	-26.7892	0.189641	0.702925
PB17	-11.5211	-11.7654	0.244291	2.12038	-11.7747	0.253619	2.201344
PB18	-18.8852	-18.6447	0.240508	1.273526	-18.6553	0.229933	1.217528
PB19	-23.0422	-23.489	0.446789	1.939002	-23.4953	0.453061	1.966223
PB20	-18.8852	-18.6445	0.240654	1.274301	-18.6524	0.232813	1.23278
Rata-Rata			0.104031	0.432559		0.105039	0.437894

Analisis 3D

Pada analisis 3D semua komponen jembatan dimodelkan. Pemodelan struktur 3D pada perangkat lunak FEM dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan Struktur 3D

Terdapat 20 posisi beban pada analisis 3D yang dimasukan. Posisi beban pada pemodelan struktur 3D dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Posisi beban 3D

Posisi beban	Load Configuration	No	Load Configuration
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	
13		14	
15		16	
17		18	
19		20	

Hasil analisis dua dimensi berupa data nilai defleksi dan data rotasi yang kemudian diolah dengan menggunakan perangkat lunak statistika sehingga didapatkan persamaan regresi. Hasil FEM dan persamaan regresi dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Hasil FEM 3D

Posisi Beban	δ (mm)	Φ_1 (Rad)	Φ_2 (Rad)
	(L=30m)	(L=0m)	(L=60m)
1	-10.0518	0.00083	-0.00051
2	-10.5776	0.0008	-0.00061
3	-9.0791	0.00048	-0.00073
4	-7.6531	0.00054	-0.00048
5	-7.4278	0.0006	-0.00039
6	-8.178	0.00068	-0.00041
7	-31.6366	0.00211	-0.00211
8	-4.9545	0.00026	-0.0004
9	-7.5731	0.00037	-0.00064
10	-4.1994	0.0002	-0.00036
11	-4.5036	0.00038	-0.00022
12	-14.9171	0.00119	-0.0008
13	-6.4468	0.00056	-0.0003
14	-18.2145	0.00134	-0.00109
15	-5.9213	0.00036	-0.00043
16	-5.696	0.00043	-0.00033
17	-5.7076	0.00026	-0.0005
18	-4.3557	0.00039	-0.00019
19	-13.4106	0.00095	-0.00084
20	-11.0119	0.00066	-0.00081

Keterangan:

δ = Lendutan

Φ = Putaran sudut

Tabel 8. Persamaan regresi linear dan kuadratik tiga dimensi

Jumlah Data Rotasi	Persamaan Regresi Linear
2 (L = 0 dan L = 60m)	$\delta = -0,005 - 7494,924\phi_1 + 7494,073\phi_2$
Jumlah Data Rotasi	Persamaan Regresi Kuadratik
2 (L = 0 dan L = 60m)	$\delta = -0,010 - 7489,546\phi_1 + 7478,639\phi_2 - 116522,203\phi_1\phi_2 - 58373\phi_1^2 + 67762,452\phi_2^2$

Perbedaan defleksi hasil FEM dibandingkan dengan defleksi hasil regresi untuk kasus 2D dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Defleksi FEM vs defleksi regresi 2D

Posisi Beban	δ FEM (mm)	Linear			Kuadratik		
		δ Regresi (mm)	Perbedaan Lendutan (mm)	Persentase Perbedaan (%)	δ Regresi (mm)	Perbedaan Lendutan (mm)	Persentase Perbedaan (%)
1	-10.0518	-10.0481	0.0037318	0.037126	-10.0494	0.00237294	0.023607
2	-10.5776	-10.5726	0.0049722	0.0470073	-10.5698	0.00779947	0.073736
3	-9.0791	-9.07354	0.0055591	0.06123	-9.0736	0.00549757	0.060552
4	-7.6531	-7.64972	0.003382	0.0441908	-7.64702	0.00608342	0.07949
5	-7.4278	-7.42495	0.0028531	0.0384112	-7.42494	0.00286487	0.03857
6	-8.178	-8.17442	0.0035777	0.0437483	-8.17551	0.00248698	0.030411
7	-31.6366	-31.6321	0.0045122	0.0142627	-31.6362	0.00044629	0.001411
8	-4.9545	-4.95161	0.0028865	0.0582606	-4.95189	0.00260932	0.052666
9	-7.5731	-7.57463	0.0015327	0.0202381	-7.5761	0.00299875	0.039597
10	-4.1994	-4.20216	0.0027551	0.0656075	-4.20343	0.00402997	0.095965
11	-4.5036	-4.50207	0.0015288	0.0339462	-4.50378	0.00017904	0.003975
12	-14.9171	-14.9195	0.002422	0.0162363	-14.9211	0.0039556	0.026517
13	-6.4468	-6.45068	0.0038834	0.0602369	-6.45305	0.00624967	0.096942
14	-18.2145	-18.217	0.0025418	0.0139546	-18.2133	0.00117717	0.006463
15	-5.9213	-5.92593	0.0046281	0.0781596	-5.92459	0.00329157	0.055589
16	-5.696	-5.70117	0.0051654	0.0906853	-5.70058	0.00457714	0.080357
17	-5.7076	-5.70102	0.0065792	0.1152711	-5.70282	0.00477638	0.083685
18	-4.3557	-4.3522	0.0035018	0.0803948	-4.35504	0.00066171	0.015192
19	-13.4106	-13.4205	0.0099032	0.0738458	-13.4151	0.00451928	0.033699
20	-11.0119	-11.0222	0.010253	0.0931086	-11.0189	0.006975	0.063341
Rata-Rata			0.0043085	0.0542961		0.00367761	0.048088

Perbandingan tingkat akurasi 2D VS 3D

Dari persamaan regresi linear dan kuadratik untuk kasus 2D dan 3D dapat diperiksa tingkat akurasi persamaan regresi defleksi 2D dan persamaan regresi 3D dengan cara memasukan kembali data rotasi hasil FEM ke dalam tiap-tiap persamaan regresi yang telah dibuat sehingga dapat dibandingkan tingkat akurasi 2D dengan 3D. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan tingkat akurasi persamaan 2D vs 3D

Jumlah Titik Rotasi yang Diperhitungkan	Derajat Fungsi Pendekatan	Rata-Rata Perbedaan 2D vs 3D	
		2D	3D
2 (L = 0 dan L = 60m)	Linear	0,1 mm (0,43%)	0,0043 mm (0,054%)
	Kuadratik	0,1 mm (0,43%)	0,0036 mm (0,048%)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Hasil analisis pendekatan antara regresi linear dan kuadratik dengan menggunakan 2 data rotasi kasus 2D dan 3D mempunyai hasil yang hampir sama sebaiknya untuk keperluan praktis cukup digunakan regresi linear saja.
- b. Analisis 2D jika dibandingkan dengan analisis 3D mempunyai hasil yang lebih akurat 3D dengan perbedaan 0,376% untuk regresi linear dan 0,382% untuk regresi kuadratik.

Adapun saran yang dapat diberikan untuk melengkapi studi ini dan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Perlu dilakukan lebih banyak variasi jenis beban dan jumlah beban.
- b. Perlu dilakukan analisis dengan jenis bentang *continuous span*.
- c. Menggunakan data regangan (*strain gauge*) untuk memprediksi lendutan.
- d. Menggunakan jenis jembatan yang lain seperti salah satunya *cable-stayed*

REFERENSI

- Brownjohn. (2006). Structural Health Monitoring of Civil Structures. Philosophical Transactions Royal Society A.
- Harpriambodo, T. (2019). Numerical analysis of three span continuous bridge deflection by using rotation. International Journal of Innovative Research in Science. *Engineering and Technology*, 9-12.
- Liu dkk,. (2009). Bridge System Performance Assessment from Structural Health Monitoring: A Case Study. *ASCE*, 1-2.
- Ozakgul dkk,. (2009). Load Testing of Bridges Using Tiltmeters. *Society for Experimental Mechanics Inc*, 1.
- Penuntun dkk,. (2019). Bridge Displacement Estimation using Tiltmeter Data. *Journal of The Civil Engineering Forum*, 105-111.
- Sousa dkk,. (2013). Bridge Deflection Evaluation using Strain and Rotation Measurements, *Article in Smart Structures and Systems*, 5.