

ANALISIS PENGARUH GAYA GEMPA TIDAK SERAGAM TERHADAP RESPONS STRUKTUR JEMBATAN GANTUNG

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF NON-UNIFORM SEISMIC LOAD ON THE STRUCTURAL RESPONSE OF SUSPENSION BRIDGE

Putri Kumala Sari^{1a*}, Yolla Fransiska^{2b}

^aPoliteknik Negeri Padang, Jurusan Teknik Sipil, Prodi Perancangan Jalan dan Jembatan, Kampus Limau Manis Padang 25163, Telp. 0751-72590 Fax. 0751-72576, Indonesia

^bPoliteknik Negeri Padang, Jurusan Teknik Sipil, Prodi Teknologi Sipil, Kampus Limau Manis Padang 25163, Telp. 0751-72590 Fax. 0751-72576, Indonesia

e-mail: putrikumalasari1998@gmail.com, yollafransiska8@gmail.com

ABSTRACT

Bridges are essential infrastructures that serve to connect two regions separated by various geographical conditions. Among the various types of bridges, suspension bridges are commonly used for long-span applications. The main structural components of a suspension bridge consist of the main cables and vertical suspenders. Due to their long spans, suspension bridges are susceptible to differential ground motions at each support, which may arise from varying soil conditions—this phenomenon is referred to as multi-support excitation. In this study, three types of analyses were conducted: static analysis, dynamic analysis under longitudinal seismic excitation, and dynamic analysis under transverse seismic excitation, using MIDAS Civil software. The soil conditions applied in all three analyses were assumed to be stiff soil at the left support and soft soil at the right support. The structural responses observed include internal forces and displacements. The seismic loads were defined using the time history method. The time history records were derived from the conversion of response spectra for the Bukittinggi region, considering both stiff and soft soil conditions. The results indicate that, in both longitudinal and transverse dynamic seismic analyses, the highest internal force values predominantly occurred at the support located in the soft soil area, except for moment values, which reached their maximum at the support in the stiff soil area. The maximum Dynamic Amplification Factor (DAF) in the longitudinal direction of the girder occurred at an element located at 0,25 of the span length on the right side, with a value of 2,621.

Keywords: multi support excitation, time history, dynamic amplification factor, midascivil

I. PENDAHULUAN

Jembatan gantung merupakan tipe jembatan yang memiliki pelat tergantung di bawah kabel utama melalui tali penggantung vertikal. Desain jembatan gantung modern memungkinkan jembatan ini untuk melintasi jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan tipe jembatan lainnya. Komponen utama dari jembatan ini adalah sistem kabel. Gaya yang dominan bekerja pada struktur ini adalah gaya tarik pada kabel dan gaya tekan pada menara pendukung. Kabel dikaitkan pada kedua ujung jembatan untuk mempertahankan tegangan yang stabil. Jembatan ini mampu menjangkau bentang mulai dari 70 hingga 2000 meter [1]. Jembatan gantung menawarkan berbagai keunggulan dari sisi teknis dan estetika, serta mampu menjangkau bentang menengah hingga panjang. Struktur ini cocok untuk pembangunan dengan bentang panjang karena memiliki tingkat presisi, performa, serta sistem komputasi dan kontrol yang tinggi pasca

konstruksi, sehingga menjamin keamanan penggunaannya. Di berbagai belahan dunia, telah dibangun banyak jembatan gantung dengan bentang panjang, dan mayoritas dari struktur tersebut menggunakan material baja [2].

Variasi spasial dari pergerakan tanah akibat gempa seringkali diabaikan dalam analisis seismik jembatan karena metode desain yang disederhanakan. Mengingat gelombang gempa yang merambat pada jembatan bentang panjang dari sumber ke permukaan dengan kecepatan yang terbatas, maka dapat dipahami secara intuitif bahwa seluruh penyangga jembatan tidak akan bergerak secara serentak [3]. Akibatnya, respons gempa pada tiap tiang diperkirakan tidak akan sama. Saat gelombang gempa merambat, terjadi perubahan seperti refleksi, pembiasan, dan kehilangan konsistensinya. Karakteristik spektral dari gerakan tanah dapat berubah karena (a) efek perjalanan gelombang, yang timbul akibat perbedaan waktu kedatangan gelombang seismik

di masing-masing titik penopang; (b) efek ketidakkoherenan, yang disebabkan oleh sumber gempa yang luas, di mana perbedaan frekuensi dalam konfigurasi spasial antara sumber dan lokasi menghasilkan pergeseran waktu tiba; (c) pengaruh kondisi tanah setempat, yang menimbulkan penyebaran gelombang seperti refleksi, pembiasan, dan bentuk gangguan lainnya akibat ketidakaturan pada lintasan perambatan gelombang [4].

Pengaruh dari adanya variabilitas spasial gerakan tanah ditemukan lebih signifikan dibandingkan pengaruh bentuk geometris jembatan [5]. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pentingnya pemahaman mengenai perilaku struktur jembatan bentang panjang ketika mengalami beban gempa, khususnya dalam situasi nyata. Dengan bertambahnya panjang bentang, peluang terjadinya percepatan *multi support* pada berbagai titik penyangga juga semakin besar. Dalam perencanaan jembatan dengan bentang yang sangat panjang, disarankan untuk menerapkan metode eksitasi multi-penyangga karena metode ini mampu memberikan hasil yang berada di antara beban gempa dengan percepatan rendah dan tinggi yang diaplikasikan secara seragam. Selain itu, pendekatan ini juga penting untuk memperoleh analisis seismik yang lebih akurat serta mendukung evaluasi dan analisis struktur yang lebih meyakinkan pada jembatan bentang sangat panjang [6].

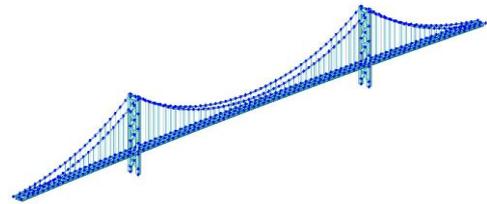
Selain itu, pada saat dilakukan analisis dinamis, gaya tumbukan dapat dimodelkan sebagai beban berbentuk pulsa persegi, dan pengaruh dinamisnya harus diperhitungkan dengan menggunakan Dynamic Amplification Factor (DAF), di mana DAF merupakan perbandingan antara respons dinamis dan respons statis [7]. DAF adalah parameter krusial dalam proses perancangan jembatan, baik untuk jembatan kereta api maupun jembatan jalan raya, serta perlu diperhitungkan dalam penilaian kapasitas beban jembatan yang telah dibangun [8]. DAF juga merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam perancangan dan analisis struktur jembatan guna memastikan proses yang efisien dan hemat biaya [9].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons struktur akibat percepatan tanah yang asimetris karena variasi kondisi tanah yang berbeda, khususnya pada struktur gelagar jembatan gantung dengan panjang bentang total 920 meter. Respons struktur yang dianalisis meliputi gaya dalam dan perpindahan serta nilai *Dynamic Amplification Factor (DAF)*.

II. METODE PENELITIAN

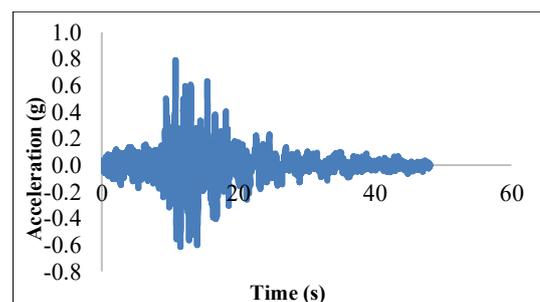
Struktur jembatan dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan *software* MIDASCivil, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pemodelan dilakukan dengan dua jenis analisis yang berbeda, yaitu analisis statis dan analisis dinamis, dengan melibatkan beberapa variabel utama. Pada analisis statis, beban yang digunakan adalah beban gravitasi, yaitu berat jembatan itu sendiri. Sedangkan pada analisis dinamis, digunakan kombinasi beban gravitasi dan beban gempa. Beban gempa dimasukkan dalam dua arah, yaitu arah x dan arah y, berdasarkan dua kondisi tanah yang berbeda, yaitu tanah keras dan tanah lunak. Zona wilayah gempa yang digunakan dalam perhitungan ini adalah Kota Bukittinggi, Sumatera Barat, yang termasuk dalam kategori wilayah dengan tingkat risiko gempa tinggi.

Variabel yang digunakan pada pemodelan ini meliputi perioda alami, gaya aksial, momen lentur, serta percepatan gempa pada masing-masing kondisi tanah. Semua variabel tersebut dianalisis untuk mengevaluasi respons dinamis struktur jembatan terhadap pengaruh gempa yang bekerja secara tidak seragam.

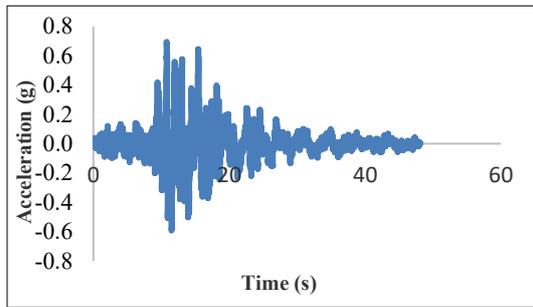


Gambar 1. Model 3D Struktural Jembatan Gantung

Beban dinamis yang dinyatakan dalam *time history* didapatkan dari hasil konversi dari data respon spektrum melalui *software* ETABS. Data respon spektrum Kota Bukittinggi di *matched* dengan data *time history* Kota Padang sehingga menghasilkan data *time history* baru seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pembebanan yang diperhitungkan adalah kombinasi antara berat sendiri dan beban gempa dengan rasio 1 : 1. Analisis dinamis dilakukan pada arah longitudinal dan arah transversal.



Gambar 2. *Accelelogram* Tanah Keras Kota Bukittinggi

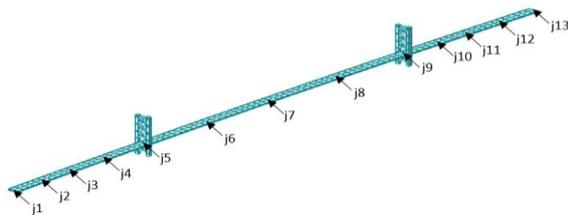


Gambar 3. *Accelelogram* Tanah Lunak Kota Bukittinggi

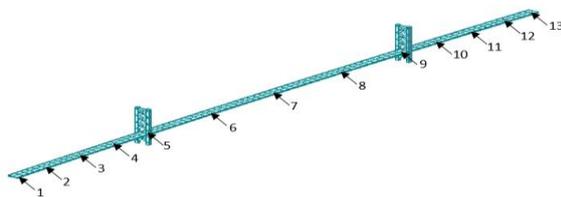
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Titik Tinjau *Joint* dan *Frame* Pada Gelagar Jembatan

Pada gelagar terdapat 13 titik *joint* yang dapat diamati pada Gambar 4 dan *frame* yang akan ditinjau seperti pada Gambar 5. Yang mana 4 titik berada di bentang kiri jembatan, 5 titik berada pada bentang tengah jembatan dan 4 titik berada di bentang kanan jembatan.



Gambar 4. *Joint* Pada Gelagar Jembatan



Gambar 5. *Frame* Pada Gelagar Jembatan

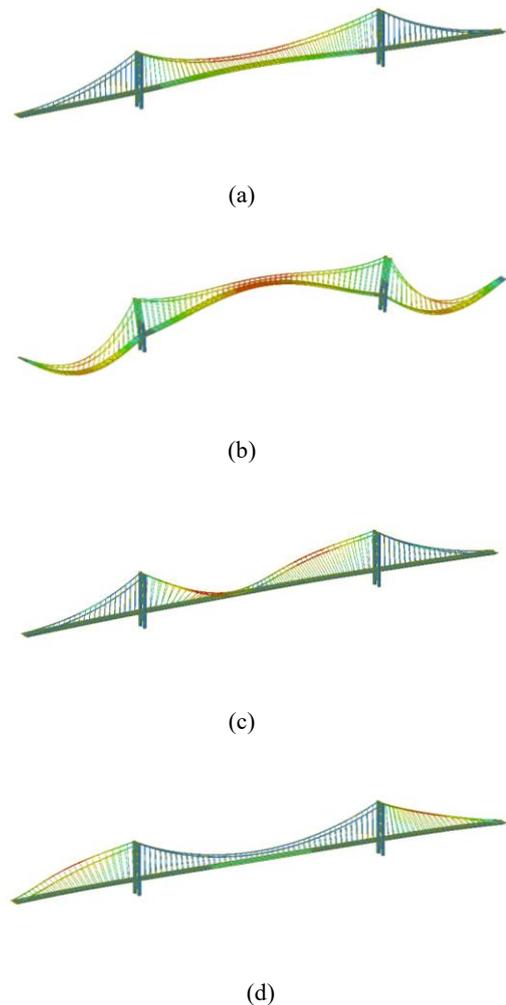
B. Analisis Ragam (*Modal Analysis*)

Analisis ragam digunakan untuk menentukan frekuensi natural struktur dan ragam bentuk getar dari suatu struktur. Analisis modal dilakukan untuk mengamati pola getaran atau bentuk mode struktur sebagai respons terhadap beban yang dikenakan pada struktur tersebut [10]. Tabel 1 merupakan tabel perubahan bentuk (*mode shape*). Dapat diperhatikan bahwa frekuensi terbesar pada mode ke-10 sebesar 1,544 rad/detik dengan periode 4,069 detik. Sedangkan frekuensi terkecil pada mode ke-1 sebesar 0,914 rad/detik dengan periode 6,876 detik. Untuk periode getar natural adalah 6,876 detik yang diperoleh dari mode pertama struktur. Dimana, mode pertama biasanya telah cukup mewakili dari keseluruhan mode yang terjadi pada struktur akibat suatu beban dinamik.

Tabel 1. *Mode Shape*

Mode	Frekuensi (rad/detik)	Unit
1	0,914	6,876
2	0,926	6,782
3	1,035	6,070
4	1,067	5,891
5	1,180	5,325
6	1,467	4,282
7	1,480	4,246
8	1,519	4,136
9	1,523	4,126
10	1,544	4,069

Pada Gambar 6 ditampilkan beberapa bentuk *mode shape* jembatan gantung yang merupakan hasil analisis menggunakan *software* MIDASCivil.



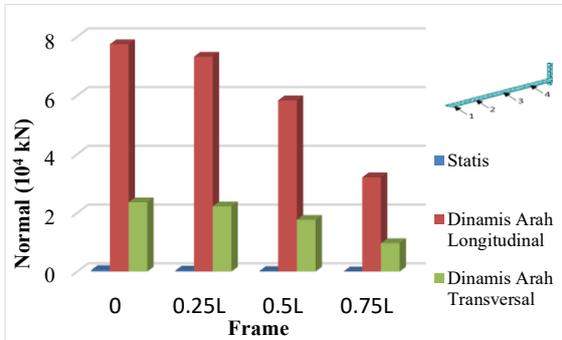
Gambar 6. *Mode Shape* pada mode (a) 1 Periode 6,876 detik (Translasi); (b) 2 Periode 6,782 detik (Translasi); (c) 6 Periode 4,282 detik (Rotasi); (d) 8 Periode 4,136 detik (Rotasi)

Nilai partisipasi masa ragam diperoleh dari hasil analisis jumlah mode getar oleh *software* MIDASCivil dalam arah longitudinal (UX) = 91,98 %, arah transversal (UY) = 97,65 %, sedangkan pada arah

vertical (UZ) = 94,52 %. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi yang paling mempengaruhi kekuatan jembatan adalah arah y dan arah z. Secara kritis jembatan menahan beban pada arah transversal (y), maka analisis lebih difokuskan pada arah tersebut.

C. Gaya Dalam

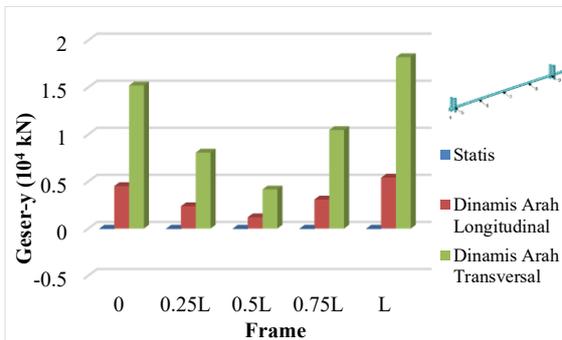
1) *Gaya Normal*



Gambar 7. Gaya Normal Gelagar Bentang Kiri

Hasil rekap nilai gaya normal pada gelagar seperti pada Gambar 7, diperoleh perbedaan maksimum antara analisis dinamis arah longitudinal dengan analisis dinamis arah transversal sebesar 231,95 % berada pada frame 0,75L bentang kiri.

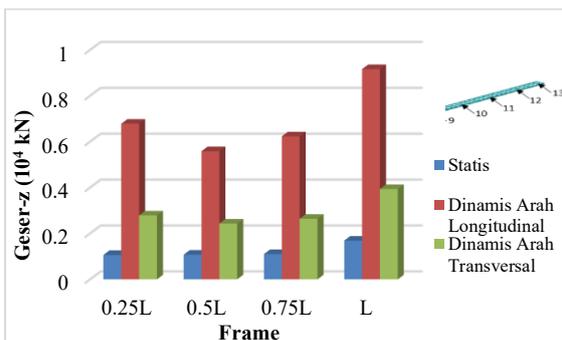
2) *Gaya Geser-y*



Gambar 8. Gaya Geser-y Gelagar Bentang Tengah

Perbedaan maksimum untuk analisis dinamis arah longitudinal dengan dinamis arah transversal untuk nilai geser-y pada gelagar berada pada frame 0,5L bentang tengah sebesar 246,35 % yang dapat diamati pada Gambar 8.

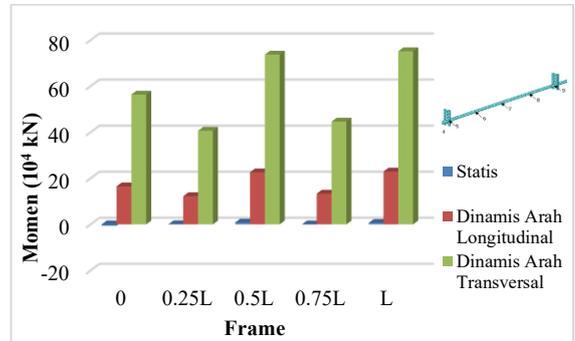
3) *Gaya Geser-z*



Gambar 9. Gaya Geser-z Gelagar Bentang Kanan

Nilai gaya geser-z gelagar frame 0,25L bentang kanan terjadi perbedaan maksimum antara analisis dinamis arah longitudinal dengan dinamis arah transversal sebesar 143,33 % seperti pada Gambar 9.

4) *Momen*



Gambar 10. Momen Gelagar Bentang Tengah

Dari hasil rekap diperoleh bahwa perbedaan maksimum untuk nilai analisis dinamis arah longitudinal dengan analisis dinamis arah transversal terjadi pada ujung gelagar bentang tengah sebesar 241,43 % seperti gambar 10.

D. Displacement

Displacement didefinisikan sebagai perpindahan dinamis dari struktur jembatan akibat beban eksternal seperti gempa. *Displacement* mencerminkan bagaimana jembatan merespons gaya dinamis dalam bentuk gerakan atau getaran. Perhitungan *displacement* memungkinkan pemantauan real-time terhadap respons jembatan selama kejadian ekstrem, mendukung evaluasi kerusakan dini dan sistem peringatan bencana.

Pada penelitian ini, nilai *displacement* yang ditinjau pada saat analisis statis dengan hanya memperhitungkan berat dari jembatan itu sendiri (beban gravitasi) dan dilanjutkan dengan analisis dinamis yang memperhitungkan kombinasi dari beban mati (beban gravitasi) jembatan dan beban gempa dengan rasio 1 : 1.

1) *Analisis Statis*

Tabel 3. *Displacement* Global Analisis Statis

Node	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
18	83,642	-0,176	-132,27
475	-44,314	-2,047	-18,236
138	0,361	-0,06	-627,665

Pada Tabel 3, nilai *displacement* terbesar pada sumbu X berada pada node 18 dengan nilai 83,642 mm, pada sumbu Y berada pada node 475 sebesar 2,047 mm. Sedangkan pada sumbu Z pada node 138 sebesar 627,665 mm.

2) Analisis Dinamis

Tabel 4. Displacement Global Analisis Dinamis Arah Longitudinal

Node	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
173	648,458	278,011	293,747
80	613,096	760,886	385,08
135	467,771	221,31	-412,388

Nilai displacement terbesar pada sumbu X berada pada node 173 dengan nilai 648,458 mm, pada sumbu Y berada pada node 80 sebesar 760,886 mm. Sedangkan pada sumbu Z terjadi pada node 135 sebesar 412,388 mm.

Tabel 5. Displacement Global Analisis Dinamis Arah Transversal

Node	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
16	232,082	1481,168	-40,178
80	132,125	2540,881	-6,716
135	152,64	739,788	-562,709

Sedangkan nilai displacement terbesar pada sumbu X berada pada node 16 dengan nilai 232,082 mm, pada sumbu Y berada pada node 80 sebesar 2540,881 mm. Sedangkan pada sumbu Z terjadi pada node 135 sebesar 562,709 mm.

E. Dynamic Amplification Factor (DAF)

DAF didefinisikan sebagai nilai hasil perbandingan antara pengaruh yang ditimbulkan akibat dinamis dan statis dari jembatan, yang menunjukkan berapa kali respons jembatan akibat kondisi statis untuk memperoleh pengaruh yang sama dengan respons jembatan akibat kondisi dinamis.

$$DAF = \frac{D_{dinamis}}{D_{statis}} \tag{1}$$

Dimana DAF adalah Dynamic Amplification Factor, $D_{dinamis}$ adalah nilai displacement kondisi dinamis, dan D_{statis} adalah nilai displacement kondisi statis.

Berdasarkan hasil rekapitulasi data yang disajikan pada Tabel 6, diperoleh bahwa nilai DAF (Dynamic Amplification Factor) maksimum untuk arah longitudinal pada gelagar jembatan terjadi pada frame 0,25L gelagar bentang kanan, dengan nilai sebesar 2,621. Nilai ini menunjukkan adanya pengaruh dinamika struktur yang signifikan pada lokasi tersebut akibat eksitasi gempa. Sedangkan pada Tabel 7, tercatat bahwa nilai DAF maksimum untuk arah transversal pada gelagar berada pada ujung bentang tengah, tepatnya di area sekitar pylon kanan jembatan, dengan nilai sebesar 0,903.

Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan nilai DAF pada arah longitudinal dan transversal dipengaruhi oleh distribusi massa dan kekakuan

struktur jembatan gantung, serta karakteristik input gempa tidak seragam yang bekerja pada struktur.

Tabel 6. Nilai DAF Displacement Arah Longitudinal pada Gelagar

Analisis Statis		DAF	Analisis Dinamis Arah Longitudinal	
Bentang Kiri			Bentang Kiri	
Frame	DZ (mm)		Frame	DZ (mm)
0	0	0,000	0	0
0,25L	-106,033	1,183	0,25L	125,402
0,5L	-160,621	1,170	0,5L	187,974
0,75L	-145,693	0,704	0,75L	102,61
Bentang Tengah		DAF	Bentang Tengah	
0	-8,24	0,619	0	-5,101
0,25L	-461,531	0,593	0,25L	-273,472
0,5L	-626,55	0,608	0,5L	-380,758
0,75L	-488,21	0,403	0,75L	196,827
L	-8,24	0,666	L	-5,487
Bentang Kanan		DAF	Bentang Kanan	
0,25L	-133,913	2,621	0,25L	351,043
0,5L	-165,544	2,235	0,5L	369,951
0,75L	-121,29	1,862	0,75L	225,821
L	0	0,000	L	0

Tabel 7. Nilai DAF Displacement Arah Transversal pada Gelagar

Analisis Statis		DAF	Analisis Dinamis Arah Longitudinal	
Bentang Kiri			Bentang Kiri	
Frame	DZ (mm)		Frame	DZ (mm)
0	0	0,000	0	0
0,25L	-106,033	0,338	0,25L	-35,79
0,5L	-160,621	0,335	0,5L	-53,861
0,75L	-145,693	0,489	0,75L	-71,226
Bentang Tengah		DAF	Bentang Tengah	
0	-8,24	0,887	0	-7,308
0,25L	-461,531	0,879	0,25L	-405,778
0,5L	-626,55	0,882	0,5L	-552,875
0,75L	-488,21	0,581	0,75L	-283,615
L	-8,24	0,903	L	-7,44
Bentang Kanan		DAF	Bentang Kanan	
0,25L	-133,913	0,101	0,25L	13,486
0,5L	-165,544	0,016	0,5L	-2,66
0,75L	-121,29	0,124	0,75L	-14,986
L	0	0,000	L	0

IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan terhadap struktur jembatan gantung, terdapat perbedaan nilai perpindahan yang sangat signifikan antara analisis statis dan analisis dinamis. Hasil analisis menunjukkan bahwa perpindahan maksimum pada pembebanan statis

terjadi pada sumbu z karena pengaruh utama berasal dari beban gravitasi. Sebaliknya, pada pembebanan dinamis, perpindahan maksimum muncul pada sumbu x dan y akibat gaya inersia gempa yang bekerja secara horizontal, dengan nilai mencapai 2,5 m. Temuan ini menunjukkan bahwa deformasi vertikal dominan dipicu oleh beban mati dan hidup, sedangkan deformasi horizontal lebih dipengaruhi oleh beban gempa. Hipotesis ini dapat menjadi landasan untuk penelitian mendatang dalam mengevaluasi pengaruh variasi arah gempa serta sistem penahan gaya lateral terhadap distribusi perpindahan maksimum struktur.

Secara umum, nilai gaya dalam terbesar berada di sekitar area perletakan, khususnya pada kondisi tanah lunak. Nilai DAF (*Dynamic Amplification Factor*) maksimum diperoleh pada bentang kanan gelagar jembatan. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh gaya gempa yang tidak seragam sangat signifikan terhadap respons struktur jembatan gantung, terutama pada arah longitudinal dan transversal, sehingga mengakibatkan distribusi gaya dalam dan perpindahan yang berbeda dibandingkan dengan analisis statis. Ketidakteraturan input gempa menyebabkan deformasi relatif antar titik tumpuan menjadi besar, yang perlu diperhitungkan dalam desain struktur jembatan bentang panjang untuk memastikan keamanan dan kinerja layanannya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penulisan jurnal ini. Kontribusi dan bantuan yang diberikan sangat berperan dalam penyelesaian jurnal ini. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. S. Nagose, 'Analysis and Design of Suspension Cable Bridge', *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 6, no. 5, pp. 1758–1763, May 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.5286.
- [2] A. Panchal, D. K. B. Parikh, and P. A. R. Darji, 'Issue 02 JETIR (ISSN-2349-5162) J ETIR1702001 Journal of Emerging Technologies and Innovations Research', 2017. [Online]. Available: www.jetir.org
- [3] S. Yadi, B. Suhendro, H. Priyosulistyo, and A. Aminullah, 'Dynamic response of long-span bridges subjected to non-uniform excitation: a state-of-the-art review', doi: 10.1051/mateconf/20192.
- [4] S. Sengupta, S. Kanike, and A. Dutta, 'Numerical Analysis for Multi-Support Excitation of a Long Bridge with Tall Piers', in *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Civil-Comp Press, Aug. 2023, pp. 1–10. doi: 10.4203/ccc.6.11.2.
- [5] A. A. Meibodi, N. A. Alexander, J. A. Norman, and A. J. Crewe, 'A theoretical and experimental exploration of the seismic dynamics of multi-span bridges', *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 9, pp. 4275–4298, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10518-020-00864-6.
- [6] Masrilayanti, A. Riza, K. Ruddy, and S. Zakpar, 'Behaviour of cable-stayed bridge's girder to multi-support excitation', *MATEC Web of Conferences*, vol. 276, p. 01037, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927601037.
- [7] H. Ma, Z. Cao, X. Shi, and J. Zhou, 'Dynamic amplification factor of shear force on bridge columns under impact load', *Shock and Vibration*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9483246.
- [8] P. Azimi and M. Yazdani, 'Calculation of Dynamic Amplification Factor for Railway Concrete and Masonry Arch Bridges Subjected to High-speed Trains', *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 876–890, 2022, doi: 10.3311/PPci.19494.
- [9] A. Prayoga Nasution, P. Basenda Tarigan, R. Kurniawan, and A. Meutia Rosario, 'Analisis Dynamic Amplification Factor (DAF) pada Jembatan Sp Gunung Kemala-Sanggi Rangka Baja dengan Metoda Analisis Respons Spektrum', 2021. [Online]. Available: <https://journal.itera.ac.id/index.php/jipad/>
- [10] R. Imani, R. Nasmirayanti, U. D. Arman, and A. Sari, 'KINERJA SEISMIK STRUKTUR PASCAGEMPA', *Rang Teknik Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 151–155, Jan. 2022, doi: 10.31869/rtj.v5i1.2974.