

Analisis Getaran Terinduksi Manusia pada Jembatan Pedestrian Tipe *Bowstring* dengan Material Kayu Ulin

Radika Gandi Tama¹, Ali Awaludin^{1*}, Djoko Sulisty¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: ali.awaludin@ugm.ac.id

INTISARI

Jembatan Mandomai, jembatan pedestrian tipe *bowstring* yang dibangun dengan material kayu ulin, dirobohkan pada 2021 silam dan akan direkonstruksi dengan mempertahankan karakteristik material dan geometri lengkungnya. Dengan fleksibilitas yang cukup tinggi, permasalahan stabilitas struktur pada jembatan *bowstring* menjadi fokus utama, terlebih pada masa pemanfaatan jembatan yang melibatkan beban bergerak. Beban bergerak berpotensi memicu respons getaran yang berlebihan sehingga menimbulkan ketidaknyamanan. Penelitian ini membahas respons struktur terhadap beban hidup dinamis pada desain struktur Jembatan Mandomai yang terletak di Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah. Metode analisis yang digunakan adalah numeris dengan cakupan analisis modal dan analisis riwayat waktu. Analisis modal menunjukkan frekuensi lentur jembatan pada 2,26 Hz. Penelitian ini melibatkan variasi densitas pengguna jembatan, dengan jumlah 45, 71, 175, dan 349 orang. Jumlah manusia yang terlibat menunjukkan korelasi positif dengan percepatan pada komponen horizontal dan vertikal, dengan magnitudo percepatan komponen vertikal terbesar adalah 0,1704 m/s². Beban kerumunan manusia yang didefinisikan menunjukkan percepatan komponen horizontal yang tidak signifikan.

Kata kunci: jembatan pedestrian, jembatan tipe *bowstring*, jembatan kayu ulin, frekuensi alami jembatan, percepatan struktur.

1 PENDAHULUAN

Perkembangan material dan desain pada saat ini telah memungkinkan pembangunan jembatan bentang panjang dengan menggunakan material yang memiliki kekakuan lebih rendah. Menurut Van Der Wardt (2008), dengan kekakuan yang lebih rendah, jembatan akan lebih rentan terhadap beban dinamis. Di saat yang bersamaan, perilaku dinamis jembatan menjadi aspek penting karena mempengaruhi keselamatan dan kenyamanan pengguna.

Penggunaan kayu sebagai material dalam konstruksi jembatan sudah dimulai sejak abad ke-16 hingga awal abad ke-19, sebelum tren penggunaan baja dan beton menggantikannya (Crocetti, 2014). Selain itu, penggunaan kayu juga didukung dengan perkembangan teknologi yang memungkinkan tersedianya produk perawatan dan sambungan kayu untuk mencapai kekuatan yang lebih tinggi. Hal ini sangat mendukung pemanfaatan kayu sebagai material utama dalam konstruksi, terutama dalam konstruksi jembatan.

Jembatan tali busur (*bowstring*) Mandomai yang terletak di Mandomai, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah, dibangun pada tahun 1973-1976 dengan desain oleh Heinz Frick, seorang arsitek dari Swiss, dan STM Mandomai (Frick, 1982), merupakan salah satu jembatan kayu yang menggunakan material kayu ulin yang mampu bertahan selama 45 tahun hingga akhirnya dirobohkan pada Februari 2021. Direncanakan rekonstruksi Jembatan Mandomai dengan mempertahankan karakteristik material dan geometri struktur untuk mempertahankan ciri khas jembatan ini. Material kayu ulin yang akan digunakan dalam rekonstruksi jembatan ini adalah kayu ulin dengan umur yang lebih muda. Menurut Garbachevski dkk. (2022), umur kayu saat dipanen akan memengaruhi kekuatan kayu tersebut. Oleh karena itu, kayu yang dipanen pada umur lebih muda akan memiliki kekuatan yang lebih rendah. Kekuatan material kayu akan berbanding lurus dengan kekakuan struktur sehingga dengan kekuatan material lebih akan memiliki kekakuan struktur yang lebih.

Jembatan tali busur memiliki tingkat fleksibilitas yang cukup tinggi karena elemen struktur pada bentang utama dipikul oleh penggantung (*hanger*) yang bersifat fleksibel. Kekakuan struktur berperan penting dalam menjaga stabilitas akibat beban eksternal yang terjadi, terutama beban dinamis. Dalam lingkup kenyamanan, beban dinamis dapat menyebabkan terjadinya resonansi atau respons getaran berlebihan sehingga dapat memengaruhi kenyamanan

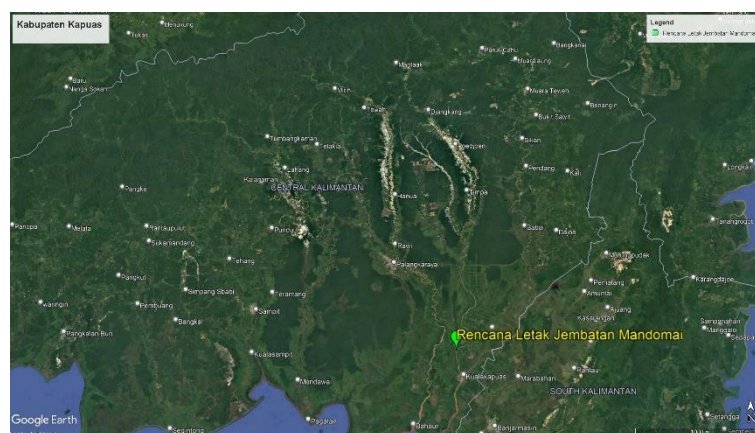
pengguna. Bagian ujung dan pangkal jembatan merupakan bagian yang akan mengalami getaran vertikal terbesar, sedangkan bagian tengah jembatan akan mengalami getaran lateral terbesar (Tank dan Vesmawala, 2024).

Penelitian ini mengkaji perencanaan rekonstruksi Jembatan Mandomai dalam lingkup kenyamanan pada kondisi kerumunan pengguna dengan mengacu pada Eurocode 1991-2:2003 dan Heinemeyer dkk. (2009). Dilakukan juga komparasi respons struktur terhadap batas kenyamanan sesuai dengan Eurocode 1990:2002. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi respons struktur Jembatan Mandomai dalam lingkup pemanfaatan kondisi berkerumun, sesuai dengan fungsi jembatan.

2 DATA DAN METODE

2.1 Lokasi

Lokasi objek penelitian Jembatan Mandomai terletak di Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah. Jembatan ini menghubungkan Desa Saka Mangkakai dengan Kelurahan Mandomai. Lokasi Jembatan Mandomai ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Peta Kabupaten Kapuas dan lokasi Jembatan Mandomai.



Gambar 2. Lokasi Jembatan Mandomai.

2.2 Data Struktur

Struktur jembatan yang menjadi objek penelitian ini adalah Jembatan Mandomai dengan detail sebagai berikut.

- Bentang samping = 12,5 meter
- Bentang bebas = 44,6 meter
- Lebar jembatan = 3 meter
- Tinggi jembatan = 11,4 meter

Adapun properti material kayu ulin yang digunakan dalam rekonstruksi, seperti yang dijelaskan oleh Subchan (2024), adalah sebagai berikut.

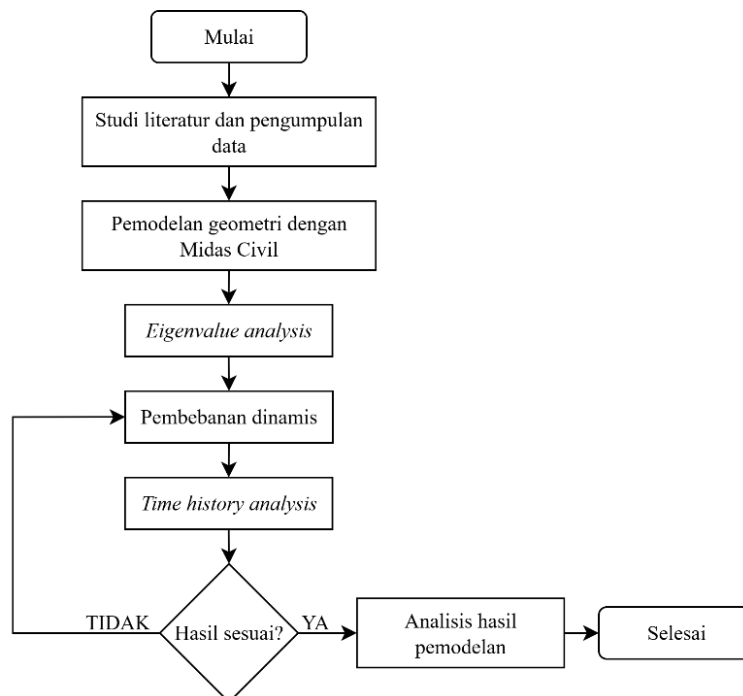
- a. Berat jenis = 1.069,56 kg/m³
- b. Modulus elastisitas lentur = 16.062,72 MPa
- c. Modulus elastisitas tekan = 13.233,83 MPa

Dalam struktur jembatan yang direncanakan, digunakan pula material baja dengan detail properti sebagai berikut.

- a. Berat jenis = 77,09 kN/m³
- b. Modulus elastisitas = 200.000 MPa
- c. *Poisson ratio* = 0,3

2.3 Metode

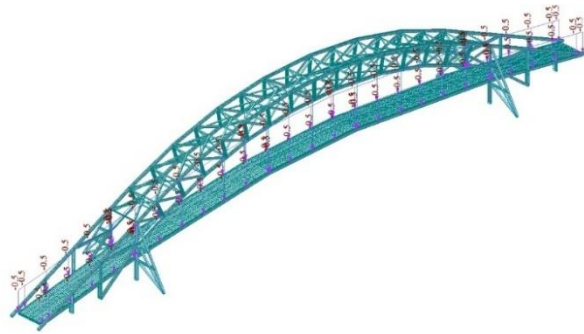
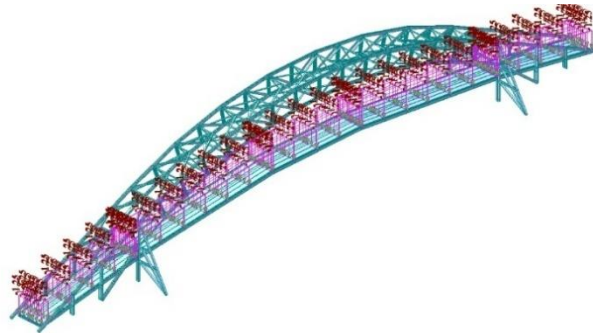
Penelitian ini mengacu pada data dan desain perencanaan rekonstruksi jembatan yang mempertahankan karakteristik geometri dan material aslinya. Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Midas Civil dengan cakupan analisis meliputi *eigenvalue analysis* serta *time history analysis*. Variasi jumlah pengguna jembatan didasarkan pada densitas pengguna jembatan yang dijelaskan oleh Heinemeyer dkk. (2009) hingga kondisi keempat. Masing-masing variasi akan dibandingkan dengan batas percepatan (lingkup kenyamanan) yang didefinisikan oleh Eurocode 1990:2002, meliputi percepatan komponen horizontal dan komponen vertikal. Prosedur penelitian yang dilakukan diilustrasikan dengan bagan alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Prosedur penelitian.

2.4 Pembebanan

Pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban statis yang didasarkan pada kemampuan material kayu ulin menahan beban, sesuai dengan yang dijelaskan oleh Subchan (2024), yaitu berat sendiri struktur (densitas material pada 2.2), beban mati tambahan (*railings*) sebesar 0,5 kN/m, serta beban hidup sebesar 1,25 kN/m². Beban dinamis kerumunan pengguna didasarkan pada hasil *eigenvalue analysis* dengan magnitudo dan pendefinisian mengacu pada Heinemeyer dkk. (2009). Ditampilkan visualisasi dari pembebanan mati tambahan pada Gambar 4 dan beban hidup statis pada Gambar 5.

Gambar 4. Beban *railings*.

Gambar 5. Beban hidup.

2.5 Analisis Modal

Pada penelitian ini, analisis modal mengacu pada ketentuan dalam SNI 1726:2019 dan Eurocode 1990:2002. Dalam analisis modal atau *eigenvalue analysis*, massa yang diikutsertakan adalah seluruh beban mati beserta beban mati tambahan dan 30% beban hidup. Analisis modal dilakukan hingga partisipasi massa struktur mencapai 90% pada komponen translasi.

2.6 Analisis Dinamis Riwayat Waktu

Pemeriksaan respons dinamis pada jembatan pedestrian, mengacu pada Eurocode 1991-2:2003, perlu dilakukan pada jembatan dengan nilai frekuensi fundamental kurang dari 5 Hz untuk getaran vertikal serta 2,5 Hz untuk getaran lateral dan puntir. Pada rentang frekuensi tersebut, struktur berpotensi mengalami resonansi yang menyebabkan ketidaknyamanan pengguna jembatan (Gheitasi dkk., 2016) karena frekuensi gerak manusia pada kondisi jalan kaki biasa berada pada rentang 1,8 – 2 Hz (Awaludin dkk., 2021). Kemudian, pada kondisi kerumunan, kenyamanan pengguna dinyatakan dalam bentuk batas percepatan, seturut dengan Eurocode 1991-2:2003, sebesar $0,4 \text{ m/s}^2$.

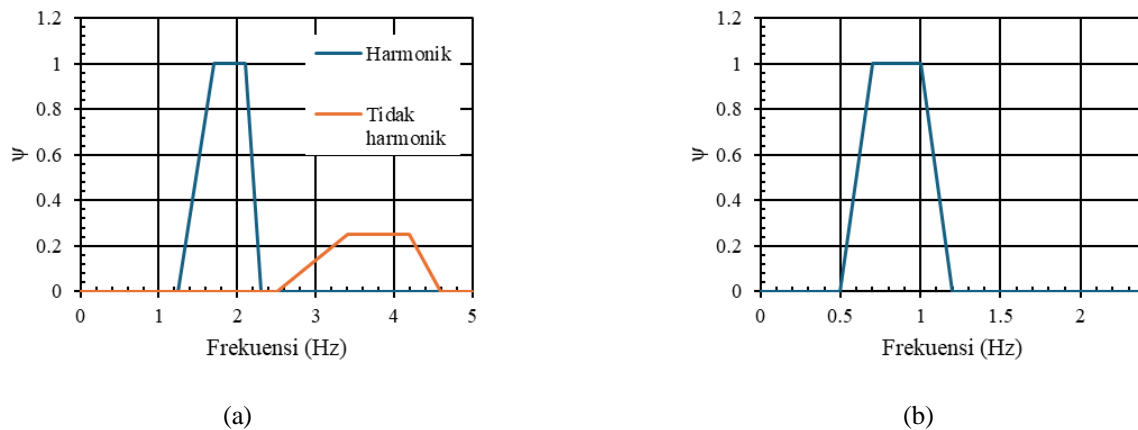
Pendefinisian beban dinamis kerumunan pengguna yang digunakan dalam analisis riwayat waktu pada formulasi yang dikembangkan oleh Heinemeyer dkk. (2009) perlu menyesuaikan dengan hasil analisis modal pada komponen *eigenvector*. Dalam formulasi yang dikembangkan, menurut Heinemeyer dkk. (2009), untuk memperoleh respons resonansi ekstrem yang terjadi pada struktur, maka frekuensi gerak didefinisikan mendekati frekuensi alami struktur pada ragam yang ditinjau serta dilakukan verifikasi pada beberapa kondisi densitas kerumunan. Formulasi magnitudo beban dinamis yang dikembangkan oleh Heinemeyer dkk. (2009) ditampilkan pada Persamaan (1).

$$p(t) = P \cos(2\pi f_s t) n' \psi \quad (1)$$

Komponen $P \cos(2\pi f_s t)$ merupakan beban harmonik akibat pejalan kaki tunggal, dengan $p(t)$ adalah beban dalam fungsi waktu, P adalah beban referensi (Tabel 1), n' adalah ekuivalensi jumlah pengguna dalam luasan yang diberi beban, dan ψ adalah faktor reduksi (Gambar 6).

Tabel 1. Nilai beban referensi (Heinemeyer dkk., 2009)

Komponen	P (N)
Vertikal	280
Longitudinal	140
Lateral	35



Gambar 6. Faktor reduksi (a) gaya arah vertikal dan longitudinal dan (b) lateral (Heinemeyer dkk., 2009).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

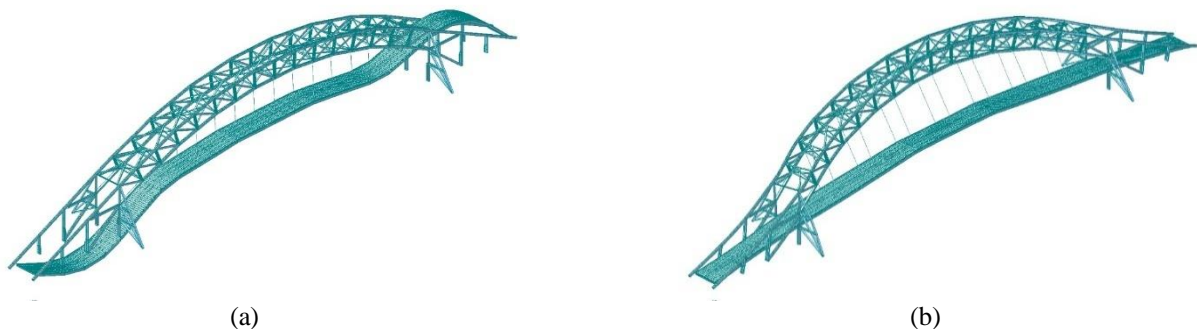
3.1 Analisis Modal

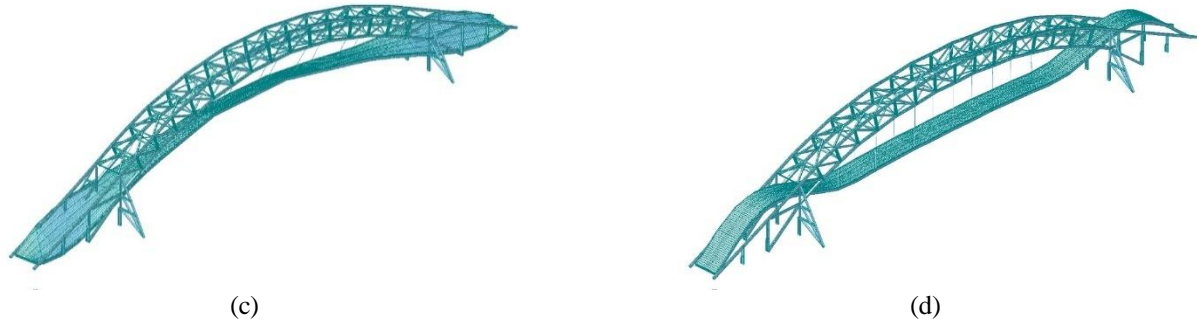
Analisis modal menghasilkan luaran berupa frekuensi alami dan bentuk ragam dari struktur jembatan. Deskripsi bentuk ragam beserta dengan frekuensi alami struktur ditampilkan dalam Tabel 2. Visualisasi bentuk ragam 1 hingga 4 ditampilkan pada Gambar 7.

Tabel 2. Deskripsi ragam dan frekuensi alami

Mode	Deskripsi	Frekuensi (Hz)
1	Translasi longitudinal orde 1	1,5455
2	Translasi lateral orde 1	1,5599
3	Translasi lateral orde 2	1,9179
4	Translasi vertikal orde 1	2,2606
6	Translasi lateral orde 3	3,2063
11	Translasi longitudinal orde 2	3,9426
13	Translasi vertikal orde 2	4,2298
18	Translasi vertikal orde 3	6,0541

Ragam ke-5 serta ke-7 hingga ke-10 yang terjadi merupakan ragam minor, yaitu getaran yang terjadi hanya bersifat lokal. Dalam *eigenvalue analysis*, hal ini ditunjukkan dengan nilai partisipasi massa yang rendah. Selain itu, ragam minor juga menunjukkan bahwa elemen yang bergetar memiliki kekakuan yang lebih rendah dibandingkan dengan elemen lain di sekitarnya.



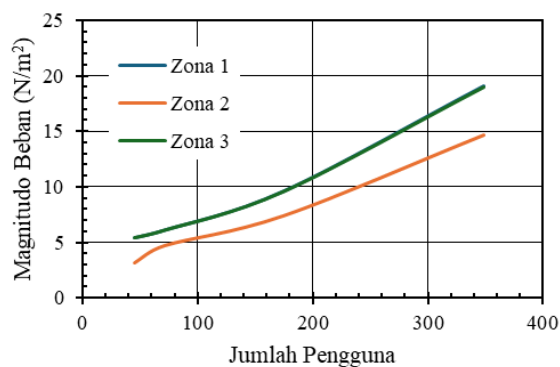


(c) (d)
Gambar 7. Visualisasi bentuk (a) ragam 1, (b) ragam 2, (c) ragam 3, dan (d) ragam 4.

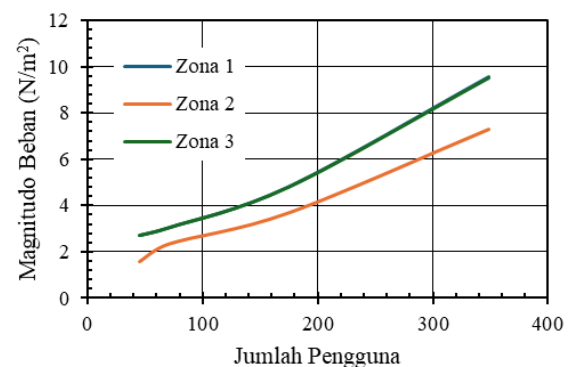
Berdasarkan hasil analisis modal, diketahui bahwa frekuensi alami translasi lateral terjadi pada frekuensi 1,5599 Hz dan lentur pada 2,2606 Hz. Dengan demikian, mengacu pada Eurocode 1990:2002, perlu dilakukan verifikasi kenyamanan jembatan terhadap penggunaannya dengan menggunakan model beban dinamis.

3.2 Verifikasi Kenyamanan

Pendefinisian gerak yang dilakukan mengacu pada frekuensi alami lentur jembatan, yang ditunjukkan pada ragam keempat. Dengan formulasi Persamaan (1) dan *eigenvector* pada ragam keempat, maka pembebanan kerumunan dibagi menjadi tiga zona serta diperoleh variasi jumlah pengguna sebanyak 45, 71, 175, dan 349 orang pada masing-masing densitas kerumunan. Selanjutnya, berdasarkan Gambar 6, beban yang didefinisikan adalah beban ke arah longitudinal dan vertikal saja. Diagram magnitudo beban hidup yang didefinisikan pada masing-masing zona yang diperoleh berdasarkan *eigenvector* ditampilkan pada Gambar 8. Visualisasi pendefinisian beban dinamis pada perangkat lunak Midas Civil ditampilkan pada Gambar 9. Verifikasi percepatan struktur dilakukan pada beberapa titik tinjauan untuk mengakomodasi kenyamanan pada setiap bagian gelagar jembatan. Titik tinjauan yang digunakan dalam verifikasi kenyamanan struktur Jembatan Mandomai ditampilkan dalam Gambar 10.

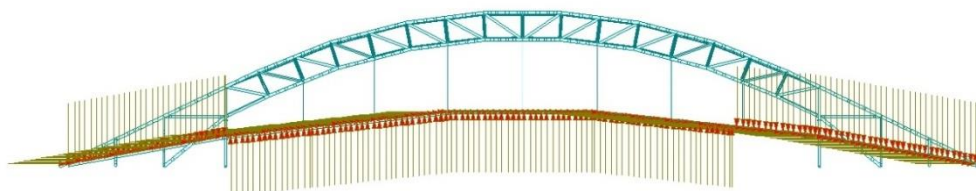


(a)

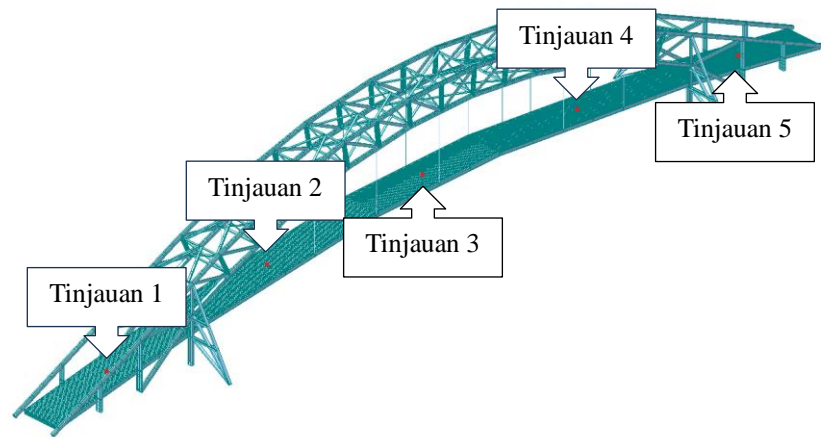


(b)

Gambar 8. Magnitudo pembebanan arah (a) vertikal dan (b) longitudinal.



Gambar 9. Pembebanan dinamis.



Gambar 10. Titik tinjauan verifikasi percepatan.

Luaran analisis dinamis yang dilakukan adalah percepatan riwayat waktu pada setiap titik tinjauan yang didefinisikan pada Gambar 10. Percepatan ini kemudian dibandingkan terhadap batas percepatan untuk kenyamanan pengguna. Hasil rekapitulasi analisis dinamis pada setiap titik tinjauan ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

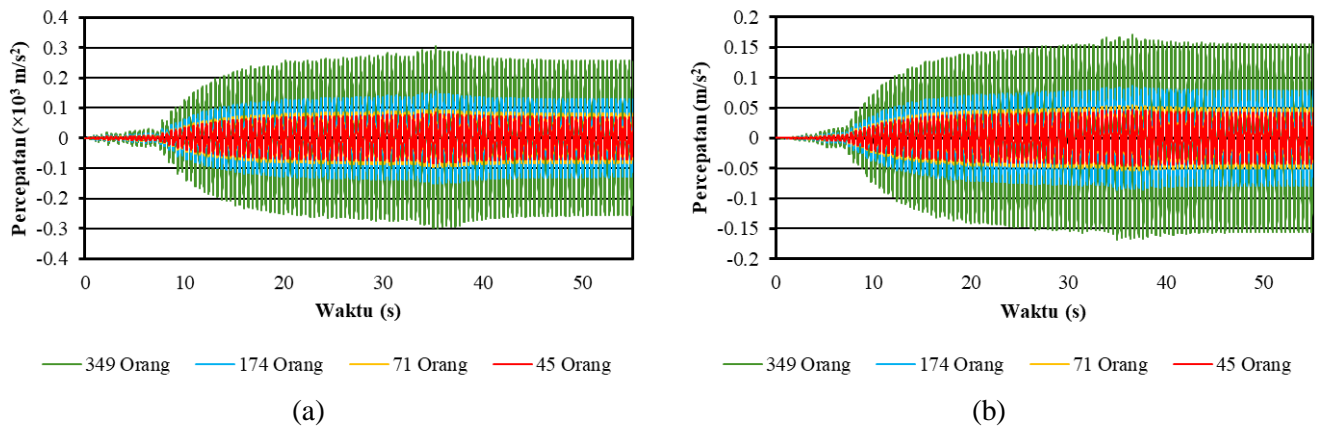
Tabel 3. Percepatan lateral maksimum ($\times 10^3 \text{ m/s}^2$) pada setiap variasi

Jumlah Orang	Tinjauan 1	Tinjauan 2	Tinjauan 3	Tinjauan 4	Tinjauan 5
45	0,0280	0,0598	0,0845	0,0610	0,0262
71	0,0353	0,0745	0,0982	0,0747	0,0332
175	0,0554	0,1169	0,1544	0,1173	0,0521
349	0,1093	0,2310	0,3052	0,2318	0,1029

Tabel 4. Percepatan vertikal maksimum (m/s^2) pada setiap variasi

Jumlah Orang	Tinjauan 1	Tinjauan 2	Tinjauan 3	Tinjauan 4	Tinjauan 5
45	0,0462	0,0045	0,0120	0,0045	0,0470
71	0,0537	0,0055	0,0140	0,0055	0,0548
175	0,0845	0,0087	0,0219	0,0087	0,0862
349	0,1670	0,0171	0,0434	0,0172	0,1704

Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4, dapat diketahui bahwa pada pangkal (tinjauan 1) dan ujung jembatan (tinjauan 5) terjadi percepatan maksimum komponen vertikal yang relatif lebih besar dibandingkan dengan tinjauan lain. Sebaliknya, magnitudo percepatan lateral relatif lebih besar pada tinjauan lainnya. Kemudian, dapat diketahui bahwa magnitudo percepatan tertinggi, baik komponen horizontal maupun vertikal, terjadi pada kondisi pengguna berjumlah 349 orang. Magnitudo percepatan menunjukkan korelasi positif dengan jumlah pengguna. Hal ini disebabkan karena gaya eksternal yang terlibat pada struktur turut meningkat, yang mana gaya eksternal berbanding lurus dengan komponen percepatan pada persamaan ekuilibrium struktur. Visualisasi percepatan riwayat waktu dengan magnitudo percepatan terbesar pada masing-masing komponen horizontal (tinjauan 3) ditampilkan pada Gambar 11(a) dan vertikal (tinjauan 5) ditampilkan pada Gambar 11(b).



Gambar 11. Diagram percepatan-waktu arah (a) lateral pada tinjauan 3 dan (b) vertikal pada tinjauan 5.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa analisis respons dinamis pada Jembatan Mandomai diperlukan sebagai konsekuensi frekuensi alami yang berada dalam rentang terjadinya resonansi akibat beban bergerak. Analisis dinamis riwayat waktu untuk beban bergerak menunjukkan bahwa getaran lateral yang terjadi tidak signifikan yang ditunjukkan dengan nilainya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan getaran vertikal. Adapun magnitudo getaran vertikal terbesar terjadi pada variasi 349 pengguna dengan nilai sebesar $0,1704 \text{ m/s}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa beban dinamis tidak menyebabkan peristiwa instabilitas pada Jembatan Mandomai. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Jembatan Mandomai memenuhi kriteria kenyamanan.

REFERENSI

- Awaludin, A., Making, M. Y. M., Ikhsan, M. N., and Adiyuano, Y. (2021). *Performance of a cold formed steel pedestrian bridge under static and dynamic loads*. Civil Engineering Dimension, 23, pp. 108–114.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Comité Européen de Normalisation. (2003). *Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Comité Européen de Normalisation. (2008). *Eurocode 0: Basis of Structural Design*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Crocetti, R. (2014). *Timber bridges: general issues, with particular emphasis on Swedish typologies*. International Holzbau-Forum, pp. 1–12.
- Frick, H. (1982). Ilmu Konstruksi Bangunan Kayu. Kanisius, Yogyakarta.
- Garbachevski, É. M., Hillig, E., De Abreu Neto, R., de Retslaff, F. A., and Koehler, H. S. (2022). *Physico-mechanical properties and growth characteristics of pine juvenile wood as a function of age and planting spacing*. Revista Árvore, 46.
- Gheitasi, A., Ozbulut, O. E., Usmani, S., Alipour, M., and Harris, D. K. (2016). *Experimental and analytical vibration serviceability assessment of an in-service footbridge*. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 6, pp. 79–88.
- Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., Lukić, M., Chabrolin, B., Lemaire, A., Martin, P.-O., Cunha, Á., and Caetano, E. (2009). *Design of Lightweight Footbridges for Human-induced Vibrations*. European Commission Joint Research Centre, Aachen.
- Subchan, S. K. (2024). Analisis Perilaku Struktur Jembatan Pedestrian Tipe Bowstring dari Material Kayu Ulin. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Tank, Y. R., and Vesmawala, G. R. (2024). *Effect of human-induced dynamic loading and its mitigation on pedestrian steel truss bridges*. Asian Journal of Civil Engineering, 25, pp. 6105–6117.
- Van Der Wardt, T. P. (2008). *Dynamic Behavior of Pedestrian Bridge*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.