

## Analisis Frekuensi Alami dengan *Undamped-Degree of Freedom System* pada Jembatan Sei Wampu

Ainil Mardhiyah<sup>1,\*</sup>, Johannes Tarigan<sup>1</sup>, Emma Patricia Bangun<sup>1</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara<sup>1</sup>, Medan

Koresponden\*, Email: [ainilmardhiyah.1109@gmail.com](mailto:ainilmardhiyah.1109@gmail.com)

|            | Info Artikel     | Abstract  |
|------------|------------------|---|
| Diajukan   | 12 Desember 2022 | <i>Natural frequency is one of the factors in bridge construction. Because the natural frequency can be used as an indicator to detect the ability of the bridge, including its ability to withstand resonance. In addition, the natural frequency is also a way to analyze damage that will or has already occurred to a bridge. One of the analytical methods that can be used to analyze natural frequency values is the Undamped Degree of Freedom. The results of this analysis show that the Undamped-DOF System method can be used in analyzing the natural frequency value of the bridge because the natural frequency value of the bridge increases with increasing modes. However, the Damped-DOF System method is recommended to be used compared to the Undamped-DOF System because the Damped-DOF System method has taken into account the damping effect, which is taken into account in designing bridges.</i> |
| Diperbaiki | 07 Agustus 2023  |   |
| Disetujui  | 30 November 2023 |   |

Keywords: Natural frequency, Bridge, Undamped-Degree of Freedom.

### Abstrak

Frekuensi alami merupakan salah satu faktor dalam pembangunan jembatan. Hal ini dikarenakan frekuensi alami dapat digunakan sebagai salah satu indikator untuk mendeteksi kemampuan jembatan, diantaranya adalah kemampuan menahan resonansi. Selain itu, frekuensi alami juga merupakan salah satu cara untuk menganalisis kerusakan yang akan ataupun telah terjadi pada jembatan. Salah satu metode analisis yang dapat digunakan untuk menganalisis nilai frekuensi alami adalah Undamped-Degree of Freedom. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Undamped-DOF System dapat digunakan dalam menganalisis nilai frekuensi alami jembatan, karena nilai frekuensi alami jembatan mengalami kenaikan seiring bertambahnya mode. Namun metode Damped-DOF System lebih disarankan penggunaannya dibandingkan Undamped-DOF System, karena metode Damped-DOF System telah memperhitungkan pengaruh redaman yang mana pengaruh redaman tersebut diperhitungkan dalam mendesain jembatan.

Kata kunci: Frekuensi alami, Jembatan, Undamped-Degree of Freedom

### 1. Pendahuluan

Jembatan Sei Wampu merupakan salah satu jembatan rangka baja yang berada di Kota Stabat Provinsi Sumatera Utara. Jembatan ini memiliki panjang total 174 meter dan dibagi menjadi tiga bentang dengan masing-masing bentang adalah 52 meter, 62,5 meter, dan 61,5 meter. Jembatan ini merupakan jembatan rangka jenis Warren dengan panel berjumlah 13 panel. Jembatan ini memiliki lebar 7 meter dan tinggi 5 meter. Gambar jembatan seperti terlihat pada **Gambar 1-3**.

Jembatan ini memiliki fungsi sebagai jembatan lalu lintas untuk menghubungkan jalan yang terputus akibat jalur sungai. Jembatan ini merupakan jembatan rangka baja, dimana jembatan rangka baja merupakan jembatan yang sering dijumpai yang berfungsi sebagai jembatan pejalan kaki, jembatan kereta api, dan jembatan jalan raya [1]. Jembatan rangka sendiri merupakan jembatan yang sistemnya disusun oleh batang-batang profil yang saling dihubungkan satu sama lain

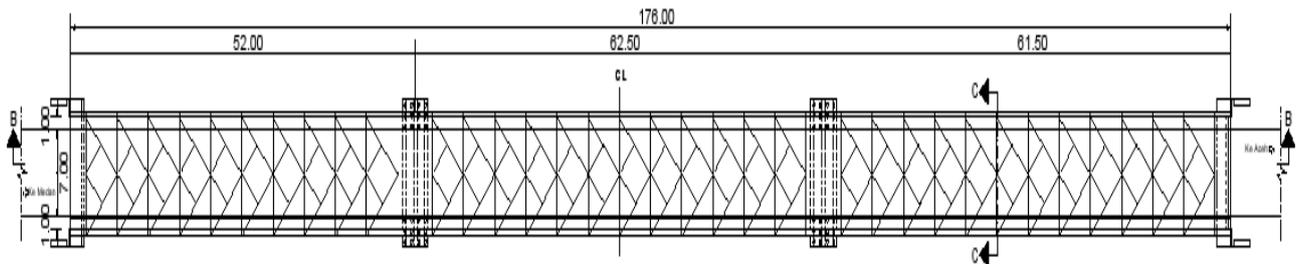
[2]. Keberadaan jembatan ini sangat penting untuk warga sekitar, sehingga kelayakan dan kemampuan dari jembatan ini perlu diawasi dengan ketat. Salah satu cara pengawasan dapat dilakukan dengan menganalisis frekuensi alami dari jembatan tersebut.

Hal ini dikarenakan, setiap struktur memiliki frekuensi yang diakibatkan getaran yang terjadi secara alami, frekuensi tersebut dinamakan frekuensi alami [3]–[8]. Frekuensi alami merupakan salah satu faktor dalam pembangunan jembatan [9], [10]. Hal ini dikarenakan frekuensi alami dapat digunakan sebagai salah satu indikator untuk mendeteksi kemampuan jembatan, diantaranya adalah kemampuan menahan resonansi [11]–[13]. Selain itu, frekuensi alami juga merupakan salah satu cara untuk menganalisis kerusakan yang akan ataupun telah terjadi pada jembatan [14], [15].

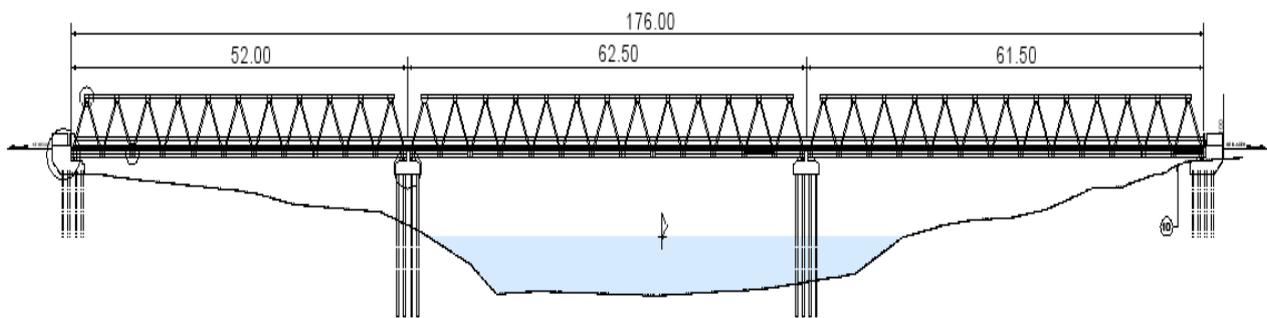
Panjang bentang jembatan, jumlah bentang, lebar jembatan, jumlah dan tinggi gelagar merupakan parameter yang mempengaruhi besar nilai frekuensi alami pada struktur

jembatan [16], [17]. Sebab ketika parameter tersebut mengalami perubahan, maka frekuensi alami jembatan akan ikut berubah [7], [18], [19]. Selain itu, pendistribusian beban dan koefisien fleksibilitas dari suatu struktur juga merupakan bagian dari parameter yang mempengaruhi besar nilai frekuensi jembatan [20]. Hal itu disebabkan perubahan

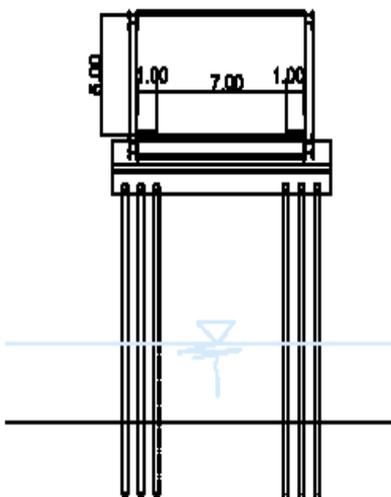
pendistribusian beban dan koefisien fleksibilitas akan mengakibatkan perubahan kekakuan struktur tersebut. Akibat perubahan kekakuan tersebut, frekuensi alami jembatan akan ikut mengalami perubahan.



**Gambar 1.** Tampak Atas Jembatan Sei Wampu



**Gambar 2.** Potongan B-B Jembatan Sei Wampu



**Gambar 3.** Potongan C-C Jembatan Sei Wampu

Untuk menganalisis frekuensi alami jembatan dapat dilakukan dengan menggunakan metode analisis dan metode eksperimental. Dengan menganalisis frekuensi alami jembat-

tan tersebut menggunakan metode analisis dan membandingkannya dengan metode eksperimental langsung pada jembatan tersebut, kerusakan pada jembatan dapat dideteksi. Hal ini dikarenakan ketika jembatan mengalami kerusakan, maka nilai frekuensi alami jembatan tersebut akan mengalami penurunan [21].

## 2. Metode

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode kuantitatif, yaitu melalui metode analisis. Metode kuantitatif merupakan suatu metode untuk menganalisis hubungan dari suatu fenomena dengan cara mengembangkan suatu model matematis, teori dan/atau hipotesis yang saling berhubungan dengan fenomena yang diteliti [22]. Metode ini disusun dengan menjelaskan masalah dari fenomena yang terjadi, menyusunnya dengan hipotesis yang ditimbulkan, meninjaunya dengan teori terkait, dan menganalisisnya menggunakan data fenomena yang ada [23].

Metode analisis yang digunakan adalah *Undamped-Degree of Freedom System (Undamped-DOF System)*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis nilai frekuensi

alami Jembatan Sei Wampu dengan menggunakan metode analisis tersebut. Dalam menganalisis nilai frekuensi alami jembatan menggunakan *Undamped-DOF System*, analisis matriks kekakuan jembatan dan matriks massa struktur jembatan terlebih dahulu dilakukan. Berikutnya dilanjutkan dengan menggunakan kedua nilai tersebut untuk menganalisis nilai frekuensi alami jembatan menggunakan *Undamped-DOF System*.

A. Analisis Kekakuan dan Massa Struktur Jembatan

Salah satu metode analisis yang dapat digunakan untuk menganalisis kekakuan suatu struktur jembatan adalah metode matriks kekakuan struktur jembatan [24]. Rangka batang adalah suatu struktur yang mana struktur tersebut memiliki satu elemen dimensi, sehingga peninjauan struktur tersebut ditinjau melalui sistem koordinat lokal [25]. Maka dari itu, matriks kekakuan jembatan dan matriks massa jembatan terlebih dahulu dianalisis dalam suatu sistem koordinat lokal. Matriks kekakuan struktur jembatan pada rangka batang dalam sistem koordinat lokal dan penambahan jumlah elemen dapat dianalisis menggunakan persamaan 1 [26]:

$$[K_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

dimana;

- [ $K_e$ ] merupakan kekakuan elemen lokal jembatan (kN/cm);
- $E$  merupakan Modulus Young (kN/cm<sup>2</sup>);
- $A$  merupakan luas penampang melintang jembatan (cm<sup>2</sup>);
- $l$  merupakan panjang penampang melintang jembatan (cm).

Matriks massa suatu struktur jembatan dalam sistem koordinat lokal juga dapat dianalisis menggunakan metode matriks yang dianalisis dengan menentukan koefisien massa dengan fungsi perpindahan baik perpindahan yang terjadi secara aksial maupun melintang [27]. Selanjutnya nilai kedua koefisien perpindahan yang terjadi secara aksial maupun melintang tersebut digabungkan sehingga menghasilkan matriks massa elemen lokal jembatan dimana gaya serta percepatan pada satu elemen dari elemen bidang saling terhubung. Penggabungan koefisien tersebut menghasilkan persamaan 2:

$$[m] = \frac{\bar{m}L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

dimana;

- [ $m$ ] merupakan matriks massa elemen lokal jembatan (kN.det<sup>2</sup>/cm);
- $\bar{m}$  merupakan berat profil jembatan (kN.det<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>);
- $L$  merupakan panjang elemen jembatan (cm).

Matriks kekakuan elemen lokal jembatan [ $K_e$ ] dan matriks massa elemen lokal jembatan [ $m$ ] yang diperoleh dari persamaan 1 dan 2 tersebut selanjutnya ditransformasikan ke dalam suatu sistem koordinat global, yaitu perkalian antara matriks elemen lokal jembatan, matriks transformasi yang telah ditransformasikan sebelumnya, dan juga matriks transformasi itu sendiri. Matriks transformasi tersebut seperti persamaan 3:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

dimana;

- [ $T$ ] merupakan matriks transformasi;
- $\alpha$  merupakan besar sudut terhadap arah horizontal.

Matriks transformasi tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisa matriks kekakuan jembatan, sehingga matriks kekakuan jembatan [ $K_g$ ] dan matriks massa jembatan [ $M_g$ ] dalam koordinat global memiliki persamaan 4 dan 5:

$$[K_g] = [T]^T [K_e] [T] \quad (4)$$

$$[M_g] = [T]^T [m] [T] \quad (5)$$

dimana;

- [ $K_g$ ] merupakan matriks kekakuan global jembatan (kN/cm);
- [ $M_g$ ] merupakan matriks massa global jembatan (kN.det<sup>2</sup>/cm);

Matriks kekakuan global jembatan dan matriks massa global jembatan inilah yang akan menjadi peninjau dalam penyusunan matriks struktur, baik matriks struktur kekakuan jembatan [ $K_s$ ] maupun matriks massa struktur jembatan [ $M_s$ ].

B. *Undamped-Degree of Freedom System (Undamped-DOF System)*

Salah satu metode analisis yang dapat digunakan untuk menganalisis frekuensi alami jembatan adalah *Degree of Freedom (DOF)*. *Degree of Freedom (DOF)* memiliki artian dalam analisis dinamis sebagai jumlah dari variabel bebas yang dibutuhkan sebuah struktur untuk memastikan lokasi sebuah koordinat umum yang dapat berupa perpindahan, defleksi, maupun besaran lainnya [28]. DOF dapat berupa *Single Degree of Freedom (SDOF)* yang memiliki satu derajat kebebasan dan *Multi Degree of Freedom (MDOF)* yang memiliki banyak derajat kebebasan. Kemunculan MDOF diakibatkan karena struktur yang dianalisis memiliki jumlah lantai lebih dari satu lantai maupun struktur yang dianalisis memiliki bentuk struktur yang rumit sehingga penggunaan SDOF sebagai metode analisis tidak dapat digunakan [29]. Salah satu penggunaan metode DOF adalah analisis frekuensi alami jembatan [30]. Nilai frekuensi alami jembatan yang dihasilkan dari metode analisis ini akan memiliki jumlah yang sama dengan jumlah derajat kebebasannya.

Metode analisis MDOF dalam analisa frekuensi alami jembatan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan adanya faktor redaman (*damped*) yang terjadi pada struktur jembatan tersebut maupun tanpa mempertimbangkan adanya faktor redaman (*undamped*) yang terjadi pada struktur jembatan tersebut. Pertimbangan penggunaan faktor redaman pada analisis frekuensi alami jembatan akan mempengaruhi nilai frekuensi alami jembatan tersebut. Nilai frekuensi alami jembatan dengan mempertimbangkan faktor redaman akan memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan nilai frekuensi alami jembatan yang faktor redamannya tidak dipertimbangkan. Hal ini dikarenakan frekuensi alami akan tersalurkan ke bantalan redaman jika faktor redaman dipertimbangkan, sehingga frekuensi alami yang diterima jembatan berkurang. Lain halnya dengan jembatan yang tidak memiliki bantalan redaman, frekuensi alami tidak akan tersalurkan ke bantalan jembatan. Sehingga frekuensi alami jembatan sepenuhnya diterima jembatan. Selain karena adanya bantalan redaman, redaman juga dapat terjadi karena adanya gerakan antar molekul di dalam material ataupun karena terdapat pelepasan energi yang diakibatkan adanya gesekan antara jembatan bagian atas dan jembatan bagian bawah.

Menurut Clough & Penzien [30], persamaan gerak pada suatu bentuk MDOF tanpa redaman menggunakan persamaan 6:

$$[M_s]\{\ddot{v}\} + [K_s]\{v\} = [M_s]\{\ddot{v}\} + [K_s]\{v\} = 0 \quad (6)$$

dimana;

$[M_s]$  merupakan matriks mass struktur (kN.det<sup>2</sup>/cm);

$\{\ddot{v}\}$  merupakan vektor percepatan (cm/det<sup>2</sup>);

$[K_s]$  merupakan matriks kekakuan (kN/cm);

$\{v\}$  merupakan vektor perpindahan yang mewakili bentuk struktur yang dipindahkan (cm).

Persamaan 6 disederhanakan kembali melalui beberapa proses penyederhanaan sehingga menghasilkan persamaan 7.

$$\| [K_s] - \omega^2 [M_s] \| = 0 \quad (7)$$

dimana;

$\omega^2$  merupakan nilai eigen atau frekuensi alami (rad/det).

Untuk membantu proses analisis, persamaan di atas akan diproses menggunakan aplikasi MATLAB. Hal ini dilakukan untuk menghindari *error* yang dapat terjadi dikarenakan jumlah data yang terlalu banyak. Maka sebab itu, aplikasi MATLAB digunakan untuk menghindari kemungkinan terjadinya *error* tersebut. Selain itu, penggunaan aplikasi MATLAB juga akan mengurangi waktu yang diperlukan dalam proses analisis.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis matriks kekakuan dan massa struktur tersebut selanjutnya disubstitusikan untuk menganalisis nilai

frekuensi alami jembatan menggunakan *Undamped-DOF System*. Nilai frekuensi alami jembatan yang diperoleh dalam metode ini akan memiliki jumlah sesuai dengan derajat kebebasan yang dimiliki struktur jembatan yang dianalisis. Dalam penelitian ini, nilai frekuensi alami jembatan yang digunakan adalah nilai frekuensi alami jembatan pada tiga mode pertama. Hasil analisis nilai frekuensi alami Jembatan Sei Wampu menggunakan *Undamped-DOF System* yang diperoleh dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Nilai frekuensi alami jembatan dengan metode *Undamped-DOF System* yang digunakan dalam penelitian ini akan dibandingkan dengan nilai frekuensi alami jembatan dengan aplikasi ABAQUS. Perbandingan ini dilakukan agar dapat diketahui perbandingan nilai frekuensi alami jembatan dengan keadaan asli di lapangan. Aplikasi ABAQUS dipilih karena nilai frekuensi alami jembatan menggunakan aplikasi ABAQUS memiliki tingkat keakuratan yang cukup tinggi saat dibandingkan dengan nilai frekuensi alami jembatan yang dianalisis menggunakan metode eksperimental. Pernyataan ini diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh X. Zhou [31]. X.Zhou dalam penelitiannya mendapatkan nilai frekuensi alami yang diperoleh menggunakan aplikasi ABAQUS sebesar 27,27 rad/det, metode eksperimental sebesar 27,21 rad/det, dan metode analitik sebesar 28,46 rad/det. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, diperoleh persentase perbandingan frekuensi alami menggunakan aplikasi ABAQUS terhadap metode eksperimental sebesar 0,22%. Hasil penelitian tersebutlah menjadi acuan dalam penelitian ini untuk menjadikan metode aplikasi ABAQUS menjadi metode perbandingan dengan metode *Undamped-DOF System*.

**Tabel 1.** Nilai Frekuensi Alami Jembatan Sei Wampu Menggunakan Metode *Undamped-DOF System*

| Mode ke- | Frekuensi alami (rad/det) |
|----------|---------------------------|
| 1        | 10,97                     |
| 2        | 18,06                     |
| 3        | 20,34                     |

Nilai frekuensi alami jembatan menggunakan aplikasi ABAQUS dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Nilai Frekuensi Alami Jembatan Sei Wampu Menggunakan Aplikasi ABAQUS

| Mode ke- | Frekuensi alami (rad/det) |
|----------|---------------------------|
| 1        | 10,71                     |
| 2        | 17,62                     |
| 3        | 19,87                     |

Dari **Tabel 1** dan **Tabel 2** terlihat bahwa semakin besar mode yang ditinjau, maka semakin besar pula nilai frekuensi

alami suatu jembatan. Hal serupa dapat dilihat pada penelitian yang dilakukan Nugroho [32]. Semakin besar mode yang ditinjau, maka bentuk getar jembatan yang ditinjau akan semakin banyak. Bertambahnya jumlah getaran yang terjadi pada jembatan mengakibatkan bertambahnya nilai frekuensi alami jembatan tersebut. Hal tersebutlah yang menyebabkan nilai frekuensi alami semakin besar saat mode yang ditinjau semakin besar.

Berdasarkan **Tabel 1** diperlihatkan bahwa nilai frekuensi alami jembatan semakin besar seiring pertambahan mode yang ditinjau. Artinya penggunaan metode *Undamped-DOF System* dalam analisis nilai frekuensi jembatan sudah benar. Hal yang sama juga berlaku pada hasil analisis nilai frekuensi alami jembatan menggunakan aplikasi ABAQUS. Pada **Tabel 2**, nilai frekuensi alami jembatan menggunakan aplikasi ABAQUS mengalami kenaikan seiring bertambahnya mode yang ditinjau.

Penggunaan aplikasi ABAQUS sebagai metode pembandingan dalam penelitian ini selain untuk meninjau nilai frekuensi alami jembatan berdasarkan mode yang ditinjau adalah karena aplikasi ABAQUS sudah mencakup pengaruh redaman dalam proses analisisnya [33]. Karena metode *Undamped-DOF System* merupakan metode dimana pengaruh redaman tidak diperhitungkan, maka dengan membandingkan metode *Undamped-DOF System* dengan aplikasi ABAQUS dapat dianalisis apakah benar diperhitungkan atau tidaknya pengaruh redaman dapat mengakibatkan perbedaan nilai frekuensi alami. Selain itu, aplikasi ABAQUS dijadikan metode pembandingan dalam penelitian ini agar dapat dilihat berapa besar pengaruh redaman dalam analisis frekuensi alami jembatan. Maka sebab itu, hasil analisis aplikasi ABAQUS dapat digunakan untuk menjadi metode pembandingan dalam penelitian ini.

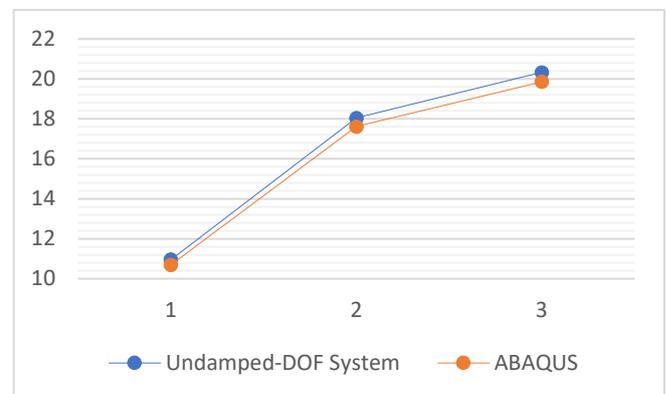
**Tabel 3.** Persentase Perbandingan Nilai Frekuensi Alami Jembatan Menggunakan Metode *Undamped-DOF System* dan Aplikasi ABAQUS

| Mode ke- | Persentase perbandingan (%) |
|----------|-----------------------------|
| 1        | 2,37                        |
| 2        | 2,44                        |
| 3        | 2,31                        |

Setelah nilai frekuensi alami jembatan menggunakan *Undamped-DOF System* dan aplikasi ABAQUS diperoleh seperti pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**, nilai frekuensi alami jembatan menggunakan kedua metode ini akan dibandingkan. Perbandingan nilai frekuensi alami jembatan menggunakan kedua metode ini dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 1**. Dari **Tabel 3** dan **Gambar 1** dapat dilihat bahwa persentase

perbandingan nilai frekuensi alami jembatan menggunakan metode *Undamped-DOF System* terhadap aplikasi ABAQUS memiliki persentase perbandingan sebesar 2,37% pada mode pertama, 2,44% pada mode kedua, dan 2,31% pada mode ketiga. Selain itu dari **Tabel 3** dapat terlihat bahwa persentase perbandingan rata-rata nilai frekuensi alami jembatan menggunakan metode *Undamped-DOF System* terhadap nilai frekuensi alami jembatan menggunakan aplikasi ABAQUS memiliki nilai sebesar 2,37%.

Dari **Tabel 3** dapat dianalisis bahwa pengaruh redaman pada nilai frekuensi alami jembatan tidak signifikan. Hal ini disebabkan persentase perbandingan antara metode *Undamped-DOF System* dan aplikasi ABAQUS memiliki persentase perbandingan <5%. Hasil ini memperlihatkan bahwa pengaruh redaman dalam analisis frekuensi alami jembatan dapat diabaikan. Namun demikian, pengaruh redaman sebaiknya tetap diperhitungkan dalam analisis frekuensi alami jembatan. Ini dikarenakan pengaruh redaman sudah langsung diperhitungkan saat pendesainan struktur jembatan dilakukan, dimana nilai koefisien pengaruh jembatan yang digunakan memiliki nilai koefisien sebesar 5% [34]. Maka dari itu, metode analisis yang disarankan untuk menganalisis nilai frekuensi alami jembatan adalah metode *Damped-DOF System*. Karena metode ini memperhitungkan pengaruh redaman dalam analisisnya.



**Gambar 1.** Grafik Persentase Perbandingan Nilai Frekuensi Alami Jembatan Menggunakan Metode *Undamped-DOF System* dan Aplikasi ABAQUS

#### 4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis, ditemukan bahwa nilai frekuensi alami Jembatan Sei Wampu memiliki nilai sebesar 10,97 rad/det pada mode pertama, 18,06 rad/det pada mode kedua, dan 20,34 rad/det pada mode ketiga. Berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa penggunaan metode *Undamped-DOF System* dalam analisis nilai frekuensi alami jembatan sudah benar. Hal ini dikarenakan nilai frekuensi alami

Jembatan Sei Wampu semakin besar seiring bertambahnya besar mode. Meskipun demikian, penggunaan metode *Damped-DOF System* lebih disarankan dibandingkan metode *Undamped-DOF System*. Hal ini disebabkan dalam pengaruh redaman diperhitungkan saat mendesain jembatan. Maka dari itu, *Undamped-DOF System* tidak disarankan untuk digunakan dalam menganalisis nilai frekuensi alami jembatan.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. F. Rosyidi, H. Sugihardjo, B. Suswanto, and A. B. Habieb, "Perbandingan Analisis Numerik dan Analitikal Kekakuan Elastik Lateral Pada Jembatan Rangka Terbuka dengan Menggunakan Program Abaqus," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 20, no. 1, pp. 95–100, 2022, doi: 10.12962/j2579-891X.v20i1.11974.
- [2] A. N. Refani, D. Dibiantara, M. Suluch, and A. F. Muqddam, "Studi Alternatif Bentuk Rangka Jembatan Canai Dingin Untuk Pejalan Kaki Bentang Kecil Terhadap Rasio Berat dan Lendutan," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 25–30, 2017, doi: 10.12962/j2579-891X.v15i1.3156.
- [3] R. Akbari, S. Maadani, and S. Maalek, "On the fundamental natural frequency of bridge decks: Review and applications," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, Dec. 2018, vol. 171, no. 12, pp. 931–945. doi: 10.1680/jstbu.17.00102.
- [4] L. Cao, J. Liu, and Y. Frank Chen, "Theoretical and Numerical Study on the Natural Frequencies of Bridges With Corrugated Steel Webs," *Structures*, vol. 15, pp. 224–231, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.istruc.2018.07.005.
- [5] S. Maulidiya and Rusli, "Penentuan Frekuensi Natural Dan Arah Pergerakan Gelombang (Studi Kasus: Jembatan Soekarno Hatta Kota Malang)," *J. MIPA UNSRAT ONLINE*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [6] D. Prawestri, W. Sutrisno, and A. Priyanto, "Perbandingan Analisis Frekuensi Alami Jembatan Gantung Dengan Menggunakan Aplikasi Accelerometer Meter Dan Software (Studi Kasus Jembatan Gantung Kemiri Buluharjo Karangmojo)," *J. Rekayasa dan Inov. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 1, pp. 54–56, 2021.
- [7] H. T. Santoso, L. F. Hidayatiningrum, A. B. Utomo, J. Hartono, and Masrianto, "Analisa Korelasi Antara Frekuensi dengan Bentang Jembatan Berdasarkan Uji Dinamik (Correlation Analysis Between Frequency and Bridge Span Based on Dynamic Test)," *J. Jalan-Jembatan*, vol. 38, no. 1, pp. 60–72, 2021.
- [8] W. Sutrisno, L. Chandra, and A. Deonanda, "Perbandingan Frekuensi Alami Jembatan Karangsemut Menggunakan Accelerometer Dan Sap2000," *J. Rekayasa dan Inov. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 2, pp. 13–18, 2021.
- [9] T. S. Chrisoffel and Priyosulistyo, "Pengaruh Frekwensi Alami Struktur Dek pada Resonansi Kabel dari Jembatan Kabel (Model Eksperimen)," Universitas Gadjah Mada, 2010.
- [10] S. Wakchaure, V. Jayan, and K. Jha, "Factors affecting priority of maintenance for bridges," *Indian Concr. J.*, vol. 87, no. 2, pp. 37–45, Jan. 2013.
- [11] D. Cantero and E. J. Obrien, "Tracing The Evolution Of Bridge Natural Frequencies As A Vehicle Traverses The Bridge," 2013.
- [12] M. Hadipour, M. T. Ahmadian, S. G. Lashkari, and A. Barari, "Natural Frequency Improvement Of A Suspended Fgm Bridge," in *The ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011*, 2011, p. 63411.
- [13] E. Wahyuni, "Studi Kelakuan Dinamis Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) Akibat Beban Individual Manusia Bergerak," *J. Tek. Sipil*, vol. 19, no. 3, pp. 181–194, 2012.
- [14] I. Mekjavić and D. Damjanović, "Damage Assessment in Bridges Based on Measured Natural Frequencies," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 17, no. 2, p. 1750022, Mar. 2017, doi: 10.1142/S0219455417500225.
- [15] S. Sirimontree, K. Chompooming, B. Witchayangkoon, and W. Prasankleaw, "Measurement of Tendon Natural Frequency and Impact on Tendon Forces of Continuous Segmental Prestressed Concrete Bridge," in *16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2016, pp. 75–80.
- [16] F. Karimi, R. Akbari, and S. Maalek, "Assessment of the fundamental natural frequency of bridge decks," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 933–948, 2019, doi: 10.1007/s42107-019-00155-9.
- [17] X. Xie, Y. Huang, and X. Qin, "A New Composite Truss Bridge and a Study on Its Dynamic Characteristics with FE and Experimental Methods," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 931–947, Mar. 2021, doi: 10.1007/s12205-021-0655-z.
- [18] I. Mohseni, A. K. A. Rashid, and J. Kang, "A Simplified Method to Estimate the Fundamental Frequency of Skew Continuous Multicell Box-

- Girder Bridges,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 11, no. 1, pp. 649–658, 2014.
- [19] P. M. Raju, M. P. Kumar, S. Adishesu, and V. V. S. S. Kumar, “Mathematical Model for Natural Frequency of Prestressed Concrete Beam Using STAAD.Pro.,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jan. 2021, vol. 1025, no. 1, p. 012008. doi: 10.1088/1757-899X/1025/1/012008.
- [20] X. Wang, “Practical Simplified Computing Method of Natural Vibration Frequency of Cable-stayed Bridge during Construction Stage,” in *3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018)*, 2018, pp. 162–167.
- [21] S. Li, “Analysis of Influence of Bridge Deck Damage on First Order Natural Frequency of Simply Supported T-Beam Bridge,” *J. Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 36, no. 3, pp. 43–48, 2021, doi: 10.21595/vp.2021.21846.
- [22] Hardani *et al.*, *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif*. Yogyakarta: Pustaka Ilmu, 2020.
- [23] C. Williams, “Research Methods,” *J. Bus. Econ. Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 65–72, 2007, doi: 10.19030/jber.v5i3.2532.
- [24] H. Riyanto, “Analisis Batang Tekuk Dalam Struktur Rangka Batang Hubungan Kaku,” *J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 2, p. 2014, 2014.
- [25] S. O. Dapas, “Aplikasi Metode Elemen Hingga Pada Analisis Struktur Rangka Batang,” *J. Ilm. MEDIA Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 156–160, 2011.
- [26] A. Nasution, *Metode Matrik Kekakuan Analisis Struktur*. Bnadung: ITB Press, 2009.
- [27] M. Paz, *Dinamika Struktur*, 2nd ed. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 1996.
- [28] Y. Bai and Z.-D. Xu, *Structural Dynamics*. New Jersey: Wiley, 2019.
- [29] M. Belgasmia, *Structural Dynamics and Static Nonlinear Analysis from Theory to Application*. Pennsylvania: IGI Global, 2020.
- [30] R. W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, 3rd ed. Berkeley: Computers & Structure Inc., 1995.
- [31] X. Zhou, L. Cao, Y. F. Chen, J. Liu, and J. Li, “Experimental and Analytical Studies on The Vibration Serviceability of Pre-stressed Cable RC Truss Floor Systems,” *J. Sound Vib.*, vol. 361, pp. 130–147, 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2015.10.001.
- [32] G. Nugroho, “Pengaruh Mode Shape Frekuensi Alami terhadap Estimasi Gaya Tarik Batang Baja dengan Metode Vibrasi,” *Semestika Tek.*, vol. 21, no. 2, pp. 198–205, 2018, doi: 10.18196/st.212226.
- [33] ABAQUS Inc., “ABAQUS Analysis User’s Manual,” 2006. <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/popups/usb-lgl.html>
- [34] W.-F. Chen and L. Duan, *Bridge Engineering Handbook Seismic Design*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b15663.

Halaman ini sengaja dikosongkan