

ANALISIS FREKUENSI ALAMI JEMBATAN SEI WAMPU: PERBANDINGAN SIMULASI ABAQUS DAN METODE *DUNKERLEY*

Ainil Mardhiyah¹

¹Program Studi Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Medan

Email: ainilmardhiyah@polmed.ac.id

Abstrak. Penelitian ini membahas perbandingan nilai frekuensi alami Jembatan Sei Wampu yang diperoleh melalui simulasi numerik *ABAQUS* dan metode teoritik *Dunkerley*. Simulasi numerik dengan *ABAQUS* menghasilkan nilai frekuensi alami sebesar 10,711 rad/det, sedangkan metode *Dunkerley* memberikan nilai sebesar 10,60 rad/det. Persentase perbedaan antara kedua metode tersebut berkisar antara 0,93% hingga 0,94%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *Dunkerley* mampu memberikan estimasi awal perilaku dinamik struktur dengan akurasi yang cukup baik. Namun, simulasi numerik menawarkan keunggulan dalam mempertimbangkan faktor-faktor kompleks seperti distribusi kekakuan, massa, dan kondisi batas struktur. Temuan ini menegaskan pentingnya penggunaan gabungan pendekatan teoritik dan numerik untuk meningkatkan keandalan hasil analisis dalam proses desain dan evaluasi struktur jembatan. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi rujukan praktis bagi para perencana struktur dalam mengoptimalkan kombinasi pendekatan teoritik dan numerik.

Kata kunci: Frekuensi Alami, *ABAQUS*, Metode *Dunkerley*, Analisis Dinamik, Struktur Jembatan

Diterima Redaksi: 30-04-2025 | Selesai Revisi: 29-05-2025 | Diterbitkan Online: 31-05-2025

1. PENDAHULUAN

Sebagai salah satu komponen penting dari suatu infrastruktur transportasi, jembatan memiliki fungsi untuk memastikan keberlangsungan suatu jaringan jalan sehingga terjadinya pergerakan yang efisien serta teratasinya batasa-batasan geografis (Dan et al., 2022; Xiao et al., 2023). Selain itu jembatan juga berfungsi untuk menentukan kapasitas serta tingkat layanan dari suatu sistem transformasi yang mengakibatkan pentingnya perencanaan yang baik, sehingga gangguan lalu lintas yang diakibatkan kegagalan jembatan dapat dihindari (Akbar et al., 2024). Jembatan juga akan mengakibatkan hubungan ekonomi dan sosial mengalami peningkatan karena isolasi komunitas berkurang serta transportasi barang dan orang menjadi lebih lancar (Mitoulis et al., 2022; Taherkhani et al., 2024).

Dalam perencanaan jembatan, terdapat beberapa faktor penting yang harus diperhatikan. Faktor-faktor penting tersebut terdiri dari geometri jembatan, kebijakan pemeliharaan, penggunaan dana, desain jembatan, kepentingan jembatan, tipe jembatan, serta frekuensi alami jembatan (Chrisoffel & Priyosulistyo, 2010; Wakchaure et al., 2013). Frekuensi alami jembatan sebagai salah satu faktor penting dalam perencanaan jembatan merupakan frekuensi di mana jembatan mengalami getaran secara alami ketika ada gangguan serta merupakan prasyarat teoritis dan eksperimental untuk kelayakan jembatan, parameter penting peredam getaran, dan penyelidikan respon getaran sistem struktural (Akbari et al., 2018; Cao et al., 2018; Maulidiya & Rusli, 2017; Prawestri et al., 2021; Santoso et al., 2021; Sutrisno et al., 2021).

Analisis frekuensi alami pada jembatan sangat penting untuk dilakukan karena dapat memberikan informasi kritis tentang kondisi struktural dan kesehatan jembatan. Selain itu, analisis frekuensi alami pada jembatan juga penting untuk memastikan kemampuannya menahan beban dan menjaga keberlanjutan, karena dapat membantu menginformasikan keputusan pemeliharaan dan pekerjaan modal (Jalalul Akbar et al., 2021). Frekuensi alami pada jembatan juga digunakan untuk menilai kapasitas lalu lintas jembatan setelah gempa, membantu dalam menentukan apakah jembatan masih aman digunakan (Tan et al., 2023).

Nilai frekuensi alami jembatan dapat mengalami perubahan. Perubahan nilai tersebut dapat menjadi indikator adanya kerusakan struktural yang mungkin tidak terlihat secara visual (Borlenghi et al., 2024; Laory et al., 2014; Torres et al., 2022). Namun, nilai frekuensi alami juga dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu dan angin. Oleh karena itu, penting untuk membedakan perubahan frekuensi yang disebabkan oleh faktor lingkungan dari yang disebabkan oleh kerusakan struktural (Laory et al., 2014; Qin & Cui, 2024).

Frekuensi alami pada jembatan juga memiliki keterkaitan erat dengan potensi resonansi dan respons dinamik terhadap gempa atau beban dinamik lainnya. Ketika nilai frekuensi alami menurun setelah mengalami eksitasi gempa, jembatan akan mengalami peningkatan risiko resonansi pada frekuensi eksitasi yang lebih rendah. Akibat risiko resonansi meningkat, respons dinamik seperti peningkatan percepatan pada puncak struktur juga akan mengalami peningkatan, yang dapat mengakibatkan kerusakan struktural seperti retakan pada beton (Jiang et al., 2019).

Frekuensi alami pada jembatan dapat dianalisis baik menggunakan metode numerik maupun metode eksperimental. Metode numerik dalam menganalisis frekuensi alami pada jembatan terdiri dari *Degree of Freedom* (DOF), metode *Dunkerley*, metode *Newton Raphson*, metode *Artificial Neural Network* (ANN), metode *Galerkin*, metode Analisis, *Modal Test*, dan metode *Finite Element Modelling* (FEM) (Akbari et al., 2018; Çevik et al., 2002; Clough & Penzien, 1995; Gan et al., 2019; Hadipour et al., 2011; Kirsanov, 2021; Xie et al., 2021). Sedangkan metode eksperimental dapat dilakukan dengan alat *Robotic Total Stations* (RTS) dan *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), teknik *Horizontal to Vertical Fourier Amplitude Spectra Ratio* (HVSAR), dan metode *Wind Tunnel* (Diana et al., 2013; Marendić et al., 2017; Maulidiya & Rusli, 2017; Permata et al., 2017). Selain menggunakan metode numerik dan eksperimental, analisis frekuensi alami pada jembatan juga dapat disimulasikan menggunakan *SAP2000* dan *ABAQUS*.

ABAQUS merupakan salah satu perangkat lunak elemen hingga yang banyak digunakan. Simulasi analisis yang dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak ini dimulai dari simulasi linier yang paling sederhana hingga simulasi non-linier yang paling kompleks dan rumit. Material maupun indenter juga dapat diatur dengan segala kondisi sehingga hasil pemodelan yang dikeluarkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan keadaan aslinya (Fauzan, 2022). Hasil analisis frekuensi alami pada jembatan menggunakan perangkat lunak ini sangat efisien dan akurat dengan data lapangan dan literatur teknis. Hal ini dikarenakan ABAQUS mampu menangkap karakteristik getaran jembatan secara efisien (Barth & Wu, 2007; Vital et al., 2023; Wodzinowski et al., 2018).

Metode *Dunkerley* adalah teknik klasik yang digunakan untuk memperkirakan batas bawah frekuensi alami struktur, termasuk jembatan. Namun, penggunaannya dalam analisis frekuensi alami jembatan saat ini lebih bersifat sebagai pendekatan awal atau estimasi kasar, bukan metode utama dalam praktik modern. Jenis jembatan yang

banyak menggunakan metode ini dalam analisis frekuensi alami diantaranya adalah struktur truss (rangka) dan balok, baik dalam bentuk asli maupun versi yang disederhanakan. Hasil dari estimasi tersebut menunjukkan bahwa nilai yang diperoleh menggunakan metode *Dunkerley* cukup akurat, terutama untuk struktur dengan banyak panel atau node, seperti jembatan rangka (Kirsanov, 2023; Kirsanov & Vorobev, 2021; Luan & N, 2024). Metode *Dunkerley* memiliki dua versi, versi klasik dan sederhana, yang mana kedua versi ini menunjukkan hasil yang akurat tetapi versi sederhana lebih mudah diaplikasikan (Kirsanov, 2023; Luan & N, 2024).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan hasil analisis frekuensi alami Jembatan Sei Wampu menggunakan simulasi numerik *ABAQUS* dan metode *Dunkerley*. Perbandingan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam memberikan gambaran awal perilaku dinamik struktur, sekaligus memperkuat argumentasi penggunaan simulasi numerik sebagai validasi dan penyempurnaan hasil analisis. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi rujukan praktis bagi perencana struktur dalam mengkombinasikan pendekatan teoritik dan numerik secara efisien dalam proses desain dan evaluasi jembatan.

2. METODE PENELITIAN

Sampel Penelitian

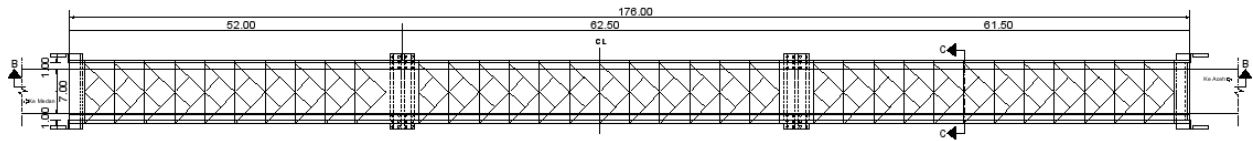
Sampel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah Jembatan Sei Wampu Kota Stabat Kecamatan Stabat Kabupaten Langkat. Lokasi jembatan ini dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Jembatan Sei Wampu merupakan jembatan rangka baja berjenis jembatan Warren yang memiliki panjang total 176 meter dan terbagi menjadi tiga bentang, yaitu 52 meter, 62,50 meter, dan 61,50 meter serta memiliki tinggi 5 meter. Jembatan ini memiliki lebar jalan 7 meter dan lebar trotoar masing-masing 1 meter di kedua sisinya.



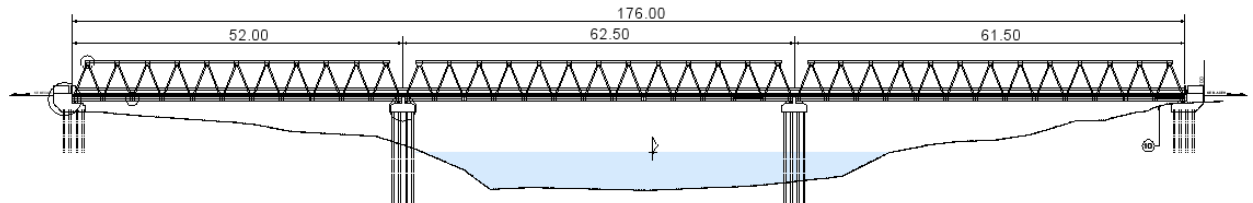
Gambar 1: Lokasi Jembatan Sei Wampu (Google Maps).

Sampel penelitian ini dapat pula dilihat seperti pada Gambar 2. yang merupakan tampak atas dari Jembatan Sei Wampu. Gambar 3. merupakan potongan B-B dari Jembatan Sei Wampu serta Gambar 4 merupakan potongan C-

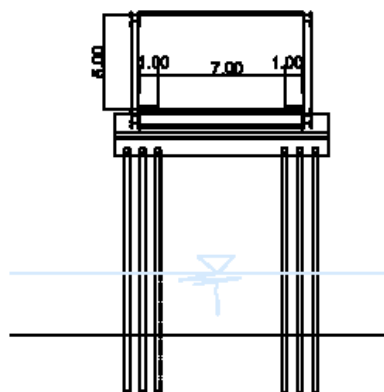
C Jembatan Sei Wampu. Dalam penelitian ini, bentang yang digunakan sebagai sampel penelitian adalah bentang dengan panjang 62,50 meter yang merupakan bentang terpanjang dari Jembatan Sei Wampu.



Gambar 2: Tampak Atas Jembatan Sei Wampu



Gambar 3: Potongan B – B Jembatan Sei Wampu



Gambar 4: Potongan C – C Jembatan Sei Wampu

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian komparatif dengan pendekatan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif merupakan studi ilmiah di mana bagian-bagian dari fenomena dan hubungan mereka sistematis. Pengembangan model matematis, teori dan/atau hipotesis yang berkaitan dengan fenomena yang terjadi merupakan tujuan dari pendekatan/penelitian kuantitatif (Hardani et al., 2020).

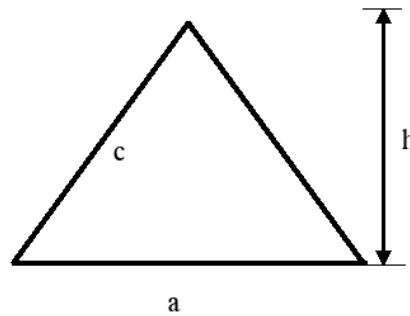
Penelitian ini juga menggunakan penelitian komparatif, di mana penelitian jenis ini memiliki tujuan untuk membandingkan satu atau lebih data sampel, satu variabel dengan variabel lainnya, atau variabel yang sama tetapi pada dua sampel atau lebih, ataupun variabel dan sampel yang sama namun dibandingkan dalam waktu ataupun metode yang berbeda (Anshori & Iswati, 2020; Suryani & Hendriyadi, 2016). Selain itu, metode penelitian ini juga merupakan penelitian yang bersifat meninjau hubungan yang dilakukan melalui pengamatan langsung pada faktor yang dianggap sebagai penyebab sebagai bahan pembandingan (Sahir, 2021).

Penelitian komparatif dalam penelitian ini adalah perbandingan dengan menggunakan dua metode analisis.

Dua metode analisis yang digunakan adalah analisis elemen hingga menggunakan perangkat lunak ABAQUS dan analisis pendekatan awal atau estimasi kasar menggunakan metode Dunkerley. Metode Dunkerley yang digunakan merupakan metode Dunkerley yang sudah disederhanakan, dimana persamaan yang digunakan adalah Pers. 1 yang dikenalkan oleh Kirsanov (2021).

$$\omega_D = (2n - 1) \sqrt{\frac{EA}{w \left(\frac{(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)}{h^2} + \frac{(C_4 a^3 + C_5 c^3 + C_6 h^3)}{2a^2} \right)}} \quad (1)$$

dengan n = jumlah panel dalam satu bentang, E = modulus elastisitas (kg/m^2), A = luas penampang (m^2), w = berat penampang (kg), a , c , dan h = panjang panel (m) yang penentuannya dapat dilihat pada Gambar 5, dan nilai dari C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , dan C_6 dapat diperoleh dari Pers. 2 – Pers. 7.



Gambar 5: Penentuan nilai a , c , dan h

$$C_1 = \frac{n(n-1)(2n-1)^2(46n^2 - 46n + 33)}{90} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{(4n-1)(4n-3)(2n-1)^2}{24} \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{4n(2n-1)(7n-4)}{3} \quad (4)$$

$$C_4 = \frac{(2n-1)(8n^4 + 32n^3 - 42n^2 + [2(3(-1))]^n + 7)n - 3(-1)^n}{3} \quad (5)$$

$$C_5 = (2n-1)(6n^2 - 4n + 1) \quad (6)$$

$$C_6 = 32n^2 \quad (7)$$

Nilai C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , dan C_6 di atas diperoleh Kirsanov menggunakan metode induksi yang melibatkan operator *rgf_findrecur* dan *rsolve* dari paket *genfunc* khusus sistem maple. Penggunaan rumus nilai frekuensi alami jembatan rangka batang di atas menurut Kirsanov memiliki Tingkat akurasi yang tinggi jika dibandingkan dengan nilai frekuensi alami jembatan rangka batang pada batas bawah (*mode shape* pertama).

Nilai *mode shape* pertama pada metode Dunkerley dapat diperoleh menggunakan Pers. 8.

$$||[K_s] - \omega^2[M_s]|| = 0 \quad (8)$$

dengan $[K_s]$ = matriks kekakuan struktur (kN/cm), ω = frekuensi alami (rad/det), dan $[Ms]$ = matrik massa struktur (kN.det²/cm²)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

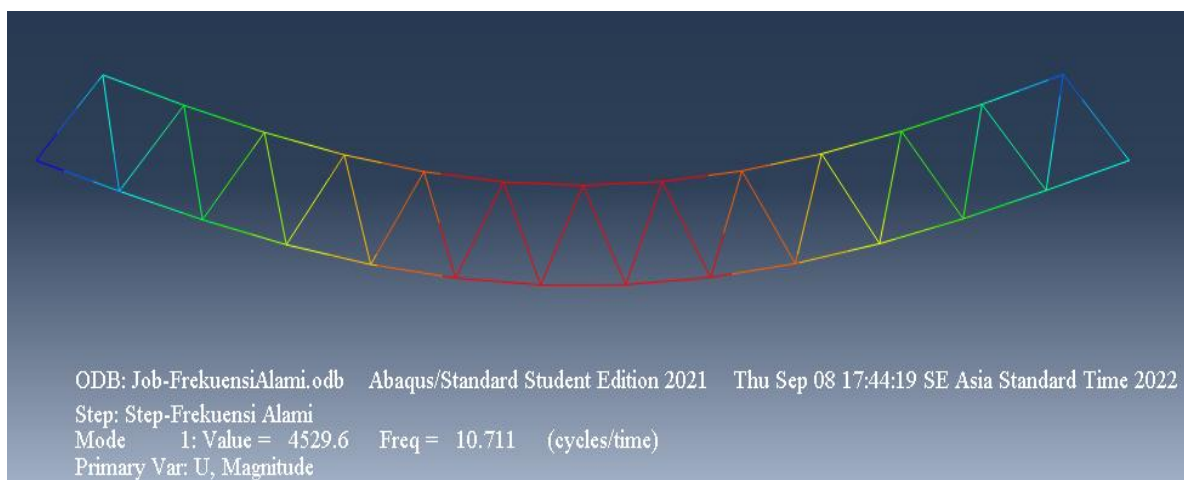
Analisis ABAQUS

Langkah analisis menggunakan perangkat lunak ABAQUS dimulai dari pendesainan jembatan, menginput material dan *section* jembatan, menggabungkan hasil input dan desain jembatan, membuat '*step*', membuat *boundary condition*, membuat '*job*', submit hasil input, pengecekan '*error*', dan diakhiri dengan hasil analisis berupa frekuensi alami dan mode shape.

Dari hasil perangkat lunak ABAQUS diketahui bahwa nilai frekuensi alami pada jembatan memiliki nilai sebesar $\omega_{ABAQUS} = 10,711$ rad/det. Perangkat lunak ABAQUS juga menunjukkan nilai mode shape pertama dengan resultan mode shape sebesar 4529,6 dan nilai mode shape pertama pada tiap node. Nilai mode shape-1 yang dihasilkan dari perangkat lunak ABAQUS dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai frekuensi alami jembatan beserta mode shape pada mode pertama menggunakan perangkat lunak ABAQUS dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 1: *Mode shape-1* jembatan menggunakan perangkat lunak ABAQUS

Mode Shape Jembatan								
ϕ_{ABAQUS}								
Noda	Arah-x	Arah-y	Noda	Arah-x	Arah-y	Noda	Arah-x	Arah-y
1	0	0	10	0,011	-0,088	19	0,008	-0,058
2	0,024	0	11	0,009	-0,072	20	0,009	-0,088
3	0,020	-0,008	12	0,008	-0,066	21	0,011	-0,088
4	0,020	-0,014	13	0,006	-0,044	22	0,011	-0,088
5	0,019	-0,044	14	0,003	-0,030	23	0,017	-0,088
6	0,019	-0,058	15	0,002	-0,008	24	0,019	-0,058
7	0,017	-0,072	16	0,002	-0,014	25	0,020	-0,052
8	0,016	-0,088	17	0,002	-0,036	26	0,024	-0,036
9	0,014	-0,088	18	0,003	-0,052	27	0,024	-0,008



Gambar 6: Nilai frekuensi alami jembatan dan *mode shape-1* menggunakan perangkat lunak ABAQUS

Analisis Metode Dunkerley

Dalam analisis menggunakan metode Dunkerley diperlukan beberapa parameter seperti jumlah bentang, n , nilai modulus elastisitas, E , nilai total luas penampang, A , dan besar massa penampang rata-rata, $\bar{m}$, dan koefisien C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 , dan C_6 . Nilai dari parameter-parameter ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2: Nilai parameter frekuensi alami menggunakan metode Dunkerley

Parameter	Nilai
Jumlah bentang, n	13
Modulus elastisitas, E [N/cm ²]	20000000
Panjang panel, a [m]	4,8
Tinggi panel, h [m]	5
Panjang bracing, c [m]	5,55
Total luas penampang, A [cm ²]	6976
Besar massa penampang rata-rata, $\bar{m}$ [kg]	451,2526
Koefisien C_1	386792250
Koefisien C_2	65078,125
Koefisien C_3	37700
Koefisien C_4	2431675
Koefisien C_5	24075
Koefisien C_6	5408

Nilai-nilai dari parameter di atas disubstitusikan ke dalam Pers. 1 sehingga diperoleh nilai frekuensi alami jembatan menggunakan metode Dunkerley sebesar $\omega_D = 10,60$ rad/det. Selain nilai frekuensi alami jembatan, nilai mode shape pada setiap noda jembatan juga dapat dianalisis berdasarkan metode Dunkerley dengan mensubstitusikan nilai frekuensi yang telah diperoleh ke dalam Pers. 8. Hasil dari substitusi tersebut diperoleh nilai mode shape pertama jembatan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3: Nilai *mode shape-1* menggunakan metode Dunkerley

Mode Shape Jembatan								
ϕ_D								
Noda	Arah-x	Arah-y	Noda	Arah-x	Arah-y	Noda	Arah-x	Arah-y
1	0	0	10	0,013	-0,079	19	0,006	-0,033
2	0,027	0	11	0,011	-0,051	20	0,008	-0,064
3	0,012	-0,006	12	0,009	-0,030	21	0,010	-0,086
4	0,017	-0,008	13	0,007	-0,026	22	0,010	-0,089
5	0,022	-0,015	14	0,004	-0,008	23	0,014	-0,065
6	0,024	-0,030	15	0,003	-0,006	24	0,017	-0,036
7	0,019	-0,048	16	0,003	-0,002	25	0,015	-0,029
8	0,019	-0,078	17	0,003	-0,009	26	0,019	-0,011
9	0,016	-0,091	18	0,004	-0,027	27	0,022	-0,004

Perbandingan Nilai Frekuensi Alami

Perbandingan nilai frekuensi alami dilakukan dengan mencari presentase *error* di antara metode numerik menggunakan ABAQUS dan metode Dunkerley. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4 terlihat bahwa nilai frekuensi alami menggunakan metode Dunkerley memiliki nilai persentase *error* <1%. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai frekuensi alami jembatan menggunakan metode

Dunkerley memiliki nilai yang mendekati penilaian numerik menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian (Kirsanov, 2021) dimana metode Dunkerley yang sudah disederhanakan tersebut akan memiliki nilai frekuensi yang mendekati nilai analitis.

Tabel 4: Persentase perbandingan frekuensi alami menggunakan ABAQUS dan metode Dunkerley

	ω_D (rad/det)	ω_{ABAQUS} (rad/det)
ω_D (rad/det)		0,93
ω_{ABAQUS} (rad/det)	0,94	

Berdasarkan Tabel 4 tersebut juga terlihat bahwa selisih antara kedua hasil tersebut sangat kecil, dengan perbedaan persentase sebesar 0,93% untuk metode Dunkerley terhadap ABAQUS dan 0,94% untuk ABAQUS terhadap metode Dunkerley. Perbedaan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa meskipun metode Dunkerley berbasis pendekatan konservatif dan asumsi penyederhanaan, tetapi metode ini tetap dapat memberikan gambaran awal yang cukup baik tentang perilaku dinamik struktur jembatan. Perbedaan tersebut juga menunjukkan bahwa simulasi numerik menggunakan ABAQUS mampu menangkap detail perilaku struktur dengan mempertimbangkan distribusi massa, kekakuan, serta *boundary conditions* yang lebih realistis, sehingga memberikan hasil yang lebih akurat.

Hasil ini memperkuat posisi simulasi numerik sebagai alat yang tidak hanya mampu memvalidasi pendekatan teoritik seperti metode Dunkerley, tetapi juga menyempurnakan analisis dengan memperhitungkan kompleksitas struktur yang tidak tertangkap dalam metode teoritik.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan bukti bahwa kombinasi antara pendekatan teoritik dan simulasi numerik dapat digunakan secara efisien dan saling melengkapi dalam proses desain dan evaluasi jembatan. Pendekatan ini juga dapat menjadi rujukan praktis bagi para perencana struktur untuk meningkatkan keandalan analisis dinamik sejak tahap awal perencanaan, hingga tahap verifikasi akhir desain struktur jembatan.

4. SIMPULAN

Penelitian ini membandingkan nilai frekuensi alami Jembatan Sei Wampu menggunakan simulasi numerik ABAQUS dan metode teoritik Dunkerley. Hasil analisis menunjukkan bahwa frekuensi alami berdasarkan simulasi ABAQUS sebesar 10,711 rad/det, sedangkan dengan metode *Dunkerley* sebesar 10,60 rad/det. Selisih antara kedua metode hanya sekitar 0,93% hingga 0,94%, yang mengindikasikan bahwa metode *Dunkerley* mampu memberikan estimasi awal perilaku dinamik jembatan secara cukup akurat. Meskipun demikian, simulasi numerik menawarkan keunggulan dalam menangkap kompleksitas struktur melalui permodelan kekakuan, massa, dan *boundary condition* secara lebih realistis. Temuan ini menegaskan pentingnya kombinasi pendekatan teoritik dan numerik untuk meningkatkan keandalan dan akurasi dalam proses desain dan evaluasi struktur jembatan.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar metode teoritik seperti *Dunkerley* digunakan pada tahap awal analisis untuk estimasi cepat, namun perlu dilanjutkan dengan simulasi numerik guna memperoleh hasil validasi

yang lebih akurat. Selain itu, untuk pengembangan penelitian di masa depan, dianjurkan untuk mengkaji pengaruh variasi kondisi batas, perubahan kekakuan, serta beban dinamis terhadap frekuensi alami guna memperkaya pemahaman perilaku dinamik struktur jembatan secara komprehensif.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. O., Handayani, E., Dwiretnani, A., & Zulfiati, R. (2024). Identifikasi Urutan Prioritas Penanganan dalam Pemeriksaan Kondisi Jembatan dengan Metode Bridge Management System (BMS). *Jurnal Talenta Sipil*, 7(2), 981. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i2.613>
- Akbari, R., Maadani, S., & Maalek, S. (2018). On the fundamental natural frequency of bridge decks: Review and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 171(12), 931–945. <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00102>
- Anshori, M., & Iswati, S. (2020). *Metode Penelitian Kuantitatif* (2nd ed.). Airlangga University Press.
- Barth, K. E., & Wu, H. (2007). Development of improved natural frequency equations for continuous span steel I-girder bridges. *Engineering Structures*, 29(12), 3432–3442. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.08.025>
- Borlenghi, P., Saisi, A., & Gentile, C. (2024). Vibration monitoring of masonry bridges to assess damage under changing temperature. *Developments in the Built Environment*, 20, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100555>
- Cao, L., Liu, J., & Frank Chen, Y. (2018). Theoretical and Numerical Study on the Natural Frequencies of Bridges With Corrugated Steel Webs. *Structures*, 15, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.07.005>
- Çevik, M., Özkaya, E., & Pakdemirli, M. (2002). Natural frequencies of suspension bridges: An artificial neural network approach. *Journal of Sound and Vibration*, 257(3), 596–604. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4237>
- Chrisoffel, T. S., & Priyosulistyo. (2010). *Pengaruh Frekwensi Alami Struktur Dek pada Resonansi Kabel dari Jembatan Kabel (Model Eksperimen)*. Universitas Gadjah Mada.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1995). *Dynamics of Structures* (3rd ed.). Computers & Structure Inc.
- Dan, D., Ying, Y., & Ge, L. (2022). Digital Twin System of Bridges Group Based on Machine Vision Fusion Monitoring of Bridge Traffic Load. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 22190–22205. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3130025>
- Diana, G., Fiammenghi, G., Belloli, M., & Rocchi, D. (2013). Wind tunnel tests and numerical approach for long span bridges: The Messina bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 122, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.012>
- Fauzan. (2022). *Pemodelan Elemen Hingga Menggunakan Software Abaqus* (1st ed.). Unhas Press.
- Gan, B. Z., Chiew, S. P., Lu, Y., & Fung, T. C. (2019). The effect of prestressing force on natural frequencies of concrete beams – A numerical validation of existing experiments by modelling shrinkage crack closure. *Journal of Sound and Vibration*, 455, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.04.030>
- Hadipour, M., Ahmadian, M. T., Lashkari, S. G., & Barari, A. (2011). Natural Frequency Improvement Of A Suspended Fgm Bridge. *The ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011*, 63411.
- Hardani, Andriani, H., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Istiqomah, R. R., Fardani, R. A., Sukmana, D. J., & Auliya, N. H. (2020). *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif* (H. Abadi, Ed.). Pustaka Ilmu.
- Jalalul Akbar, S., Maizuar, M., Yusuf, K., & Arfiandi, J. (2021). Monitoring the Dynamic Behavior of PCI Bridges

- Using Short Period Seismograph and CSI Bridge Modeling. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 1(4), 51–58. <https://doi.org/10.52088/ijesty.v1i4.168>
- Jiang, L., Kang, X., Li, C., & Shao, G. (2019). Earthquake response of continuous girder bridge for high-speed railway: A shaking table test study. *Engineering Structures*, 180, 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.047>
- Kirsanov, M. N. (2021). Dependence of the Two-Span Truss Bridge Vibration Frequency on the Number of Panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 97(4), 9703. <https://doi.org/10.4123/CUBS.97.3>
- Kirsanov, M. N. (2023). Formulas for Fundamental Natural Frequency of Plane Periodic Truss. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 19(6), 551–559. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-6-551-559>
- Kirsanov, M. N., & Vorobev, O. V. (2021). Calculating of a spatial cantilever truss natural vibration frequency with an arbitrary number of panels: analytical solution. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 94, 9402. <https://doi.org/10.4123/CUBS.94.2>
- Laory, I., Trinh, T. N., Smith, I. F. C., & Brownjohn, J. M. W. (2014). Methodologies for predicting natural frequency variation of a suspension bridge. *Engineering Structures*, 80, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.001>
- Luan, L. C., & N, K. M. (2024). Formula for the Dependence of the Fundamental Natural Frequency of a Regular Truss on the Number of Panels. *2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479871>
- Marendić, A., Paar, R., & Damjanović, D. (2017). Measurement of Bridge Dynamic Displacements and Natural Frequencies by RTS. *Gradevinar*, 69(4), 281–294. <https://doi.org/10.14256/JCE.1804.2016>
- Maulidiya, S., & Rusli. (2017). Penentuan Frekuensi Natural Dan Arah Pergerakan Gelombang (Studi Kasus: Jembatan Soekarno Hatta Kota Malang). *JURNAL MIPA UNSRAT ONLINE*, 6(1), 1–7.
- Mitoulis, S. A., Domaneschi, M., Cimellaro, G. P., & Casas, J. R. (2022). Bridge and transport network resilience – a perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, 175(3), 138–149. <https://doi.org/10.1680/jbren.21.00055>
- Permata, R., Andika, M. G., Syarifatunnisa, Risdhiawan, E., Hermawan, B., & Noordiana, I. (2017). Wind tunnel test of musi VI bridge. *3rd International Conference on Construction and Building Engineering (ICONBUILD)*, 020005-1-020005–020007. <https://doi.org/10.1063/1.5011485>
- Prawestri, D., Sutrisno, W., & Priyanto, A. (2021). Perbandingan Analisis Frekuensi Alami Jembatan Gantung Dengan Menggunakan Aplikasi Accelerometer Meter Dan Software (Studi Kasus Jembatan Gantung Kemiri Buluharjo Karangmojo). *Jurnal Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, 6(1), 54–56.
- Qin, Y., & Cui, Y. (2024). Investigation of the Natural Frequency Change of the Suspension Bridge Under Operating Conditions. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 19(3), 43–68. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2024-19.642>
- Sahir, S. H. (2021). *Metodologi Penelitian* (T. Koryati, Ed.). Penerbit KBM Indonesia.
- Santoso, H. T., Hidayatiningrum, L. F., Utomo, A. B., Hartono, J., & Masrianto. (2021). Analisa Korelasi Antara Frekuensi dengan Bentang Jembatan Berdasarkan Uji Dinamik (Correlation Analysis Between Frequency and Bridge Span Based on Dynamic Test). *Jurnal Jalan-Jembatan*, 38(1), 60–72.
- Suryani, & Hendriyadi. (2016). *Metode Riset Kuantitatif: Teori dan Aplikasi pada Penelitian Bidang Manajemen dan*

Ekonomi Islam. Prenadamedia Group.

- Sutrisno, W., Chandra, L., & Deonanda, A. (2021). Perbandingan Frekuensi Alami Jembatan Karangsemut Menggunakan Accelerometer Dan Sap2000. *Jurnal Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, 6(2), 13–18.
- Taherkhani, A., Mo, W., Bell, E., & Han, F. (2024). Towards equitable infrastructure asset management: Scour maintenance strategy for aging bridge systems in flood-prone zones using deep reinforcement learning. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105792. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105792>
- Tan, G., Li, H., Wang, W., Kong, Q., Jiang, L., Zhang, S., & Wei, X. (2023). A rapid evaluation method based on natural frequency for post-earthquake traffic capacity of small and medium span bridges. *Engineering Structures*, 280, 115681. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115681>
- Torres, M., Cifuentes, L., Pradena, M., & Dechent, P. (2022). *Influence of Bridge Deterioration on Its Natural Frequencies and Serviceability* (pp. 1270–1277). https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_144
- Vital, W., Silva, R., de Moraes, M. V. G., Emidio Sobrinho, B., Pereira, R., & Evangelista, F. (2023). Application of bridge information modelling using laser scanning for static and dynamic analysis with concrete damage plasticity. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 608–628. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.023>
- Wakchaure, S., Jayan, V., & Jha, K. (2013). Factors affecting priority of maintenance for bridges. *Indian Concrete Journal*, 87(2), 37–45.
- Wodzinowski, R., Sennah, K., & Afefy, H. M. (2018). Free vibration analysis of horizontally curved composite concrete-steel I-girder bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 140, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.011>
- Xiao, Q., Huang, H., & Tang, C. (2023). Quantitative analysis of the importance and correlation of urban bridges and roads in the study of road network vulnerability. *Advances in Bridge Engineering*, 4(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00096-z>
- Xie, X., Huang, Y., & Qin, X. (2021). A New Composite Truss Bridge and a Study on Its Dynamic Characteristics with FE and Experimental Methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(3), 931–947. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0655-z>