



## Analisis Gaya Gempa Vertikal dan Horizontal Berdasarkan *Mode Shape* Dominan pada Jembatan Sei Wampu

Ainil Mardhiyah<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Medan

\*Email [ainilmardhiyah@polmed.ac.id](mailto:ainilmardhiyah@polmed.ac.id)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan gaya inersia gempa pada arah vertikal dan horizontal berdasarkan *mode shape* dominan dari Jembatan Sei Wampu. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif dengan analisis modal linier menggunakan perangkat lunak ABAQUS untuk memperoleh frekuensi alami dan *mode shape* utama struktur. Nilai *mode shape* dan massa pada tiap node kemudian digunakan untuk menghitung gaya inersia akibat beban gempa vertikal dan horizontal berdasarkan spektrum respons elastis sesuai dengan SNI 2833:2016. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya inersia akibat gempa vertikal mencapai 811,77 kN, sedikit lebih besar dibanding gaya inersia horizontal sebesar 805,31 kN. Temuan ini menunjukkan bahwa komponen vertikal gempa, yang sering diabaikan dalam perencanaan awal struktur jembatan di Indonesia, dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap respons awal struktur. Studi ini merekomendasikan agar gaya gempa vertikal dipertimbangkan secara eksplisit dalam evaluasi awal berbasis mode dominan, terutama pada jembatan bentang panjang yang menunjukkan deformasi dominan secara vertikal pada mode pertama. Implikasi dari penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penyempurnaan standar desain seismik nasional dan peningkatan praktik evaluasi risiko jembatan di wilayah rawan gempa.

**Kata Kunci:** analisis modal, gaya inersia, gempa horizontal, gempa vertikal

### 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi, sehingga analisis beban gempa menjadi komponen krusial dalam perencanaan dan evaluasi jembatan. Penilaian kinerja seismik seperti melalui *fragility curve* berbasis *pushover* dan *incremental dynamic analysis*, memungkinkan identifikasi kerentanan struktur dan mendukung desain serta retrofit yang lebih andal [1], [2], [3]. Evaluasi pasca-gempa juga penting untuk menentukan kelayakan struktur, dengan parameter seperti *residual drift* atau perubahan frekuensi alami pier menjadi indikator penting [4], [5]. Standar desain modern juga mendorong pendekatan di mana elemen bawah struktur seperti kolom dan fondasi lebih dahulu mengalami leleh dibanding gelagar utama [2], [6].

Meskipun selama ini perhatian lebih tertuju pada gaya gempa horizontal, berbagai penelitian menunjukkan bahwa gaya gempa vertikal dapat memberikan dampak signifikan, terutama pada jembatan bentang panjang atau di wilayah dekat sumber gempa [7], [8], [9]. Gaya vertikal dapat menyebabkan peningkatan gaya aksial, risiko *unseating*, hingga amplifikasi momen sambungan superstruktur lebih dari 100% [10], [11]. Respons ini juga diperparah oleh

perubahan perilaku bantalan atau isolator, serta arah dominan percepatan vertikal yang dapat menyebabkan kegagalan tekan atau tarik [12], [13], [14]. Namun, gaya vertikal sering kali diabaikan dalam standar desain dan praktik rekayasa struktur saat ini [15], [16].

Studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa respons jembatan meningkat signifikan jika gaya vertikal dan horizontal diperhitungkan secara simultan [9], [11], [17]. Perpindahan, gaya internal, dan risiko tumbukan vertikal (*vertical pounding*) akan meningkat, terutama pada struktur dengan geometri melengkung atau fondasi yang lebih lunak [15], [16]. Identifikasi *mode shape* dominan menjadi krusial dalam mengantisipasi respons tersebut, karena menggambarkan pola deformasi utama yang muncul pada frekuensi alami tertentu [18], [19], [20]. *Mode shape* dominan juga menjadi dasar penting dalam strategi mitigasi getaran dan penguatan struktur [19], [21].

Di Indonesia sudah ada studi yang menganalisis pengaruh simultan gaya gempa vertikal dan horizontal terhadap jembatan, seperti pada Jembatan Barella tipe *cable-stayed* di wilayah Padang yang menunjukkan bahwa kedua komponen gempa berdampak signifikan terhadap perpindahan dan tegangan kabel [22]. Secara global, studi numerik dan eksperimental juga menunjukkan bahwa respons struktur terhadap gempa menjadi lebih ekstrem saat gaya vertikal diperhitungkan bersama gaya horizontal, khususnya pada jembatan bentang panjang atau dengan geometri melengkung [7], [15], [17]. Meskipun demikian, belum ditemukan kajian yang secara khusus mengevaluasi besarnya gaya inersia akibat gempa vertikal dan horizontal berdasarkan *mode shape* dominan struktur jembatan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh gaya inersia akibat gempa vertikal dan horizontal yang dihasilkan pada *mode shape* dominan dari Jembatan Sei Wampu, lalu membandingkan gaya inersia akibat gempa vertikal dan horizontal yang dihasilkan tersebut untuk menilai potensi pengaruh signifikan gaya gempa vertikal terhadap respons awal struktur, yang sering kali belum diperhitungkan dalam evaluasi desain seismik jembatan di Indonesia.

## 2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain analisis numerik eksploratif berbasis pemodelan elemen hingga (*finite element modelling*) untuk mengevaluasi gaya inersia akibat gempa baik arah vertikal maupun horizontal berdasarkan *mode shape* dominan struktur. Fokus penelitian adalah memperoleh gaya inersia akibat gempa vertikal dan horizontal yang dihasilkan pada *mode shape* dominan struktur jembatan lalu membandingkannya untuk memberikan gambaran awal tentang seberapa signifikan kontribusi gaya vertikal terhadap respons awal struktur jembatan.

Objek penelitian adalah Jembatan Sei Wampu yang berada di Kota Stabat Kecamatan Stabat Kabupaten Langkat. Lokasi jembatan ini dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Jembatan ini merupakan jembatan rangka baja tipe Warren yang memiliki panjang total 176 meter yang dibagi menjadi tiga bentang, yaitu 52 meter, 62,50 meter, dan 61,50 meter. Tinggi dari jembatan ini adalah 5 meter dengan lebar jalan 7 meter dan memiliki trotoar di kedua sisinya yang memiliki lebar 1 meter. Gambar 2 menunjukkan tampak atas, Gambar 3 menunjukkan potongan B-B, dan Gambar 4 merupakan potongan C-C dari Jembatan Sei Wampu. Bentang yang akan menjadi objek penelitian ini adalah bentang dengan panjang 62,50 yang merupakan bentang terpanjang dari Jembatan Sei Wampu.

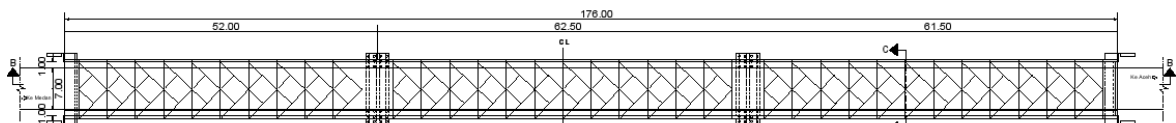
Data dikumpulkan melalui dua metode utama: (1) pengumpulan data sekunder terkait konfigurasi struktur jembatan, material, dan elemen penyusun berdasarkan dokumen teknis dan literatur, serta (2) pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak ABAQUS untuk melakukan analisis frekuensi alami serta *mode shape* jembatan. Pemodelan mencakup pendefinisian properti material, pembebanan gravitasi, kondisi batas, dan penentuan mesh yang cukup untuk memperoleh *mode shape* dominan dan frekuensi alami secara akurat. Setelah didapatkan frekuensi alami dan *mode shape* utama, dilakukan perhitungan gaya inersia akibat gempa dengan pendekatan spektrum respons gempa berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan metode modal analisis.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif, dengan membandingkan gaya inersia akibat gempa baik arah vertikal maupun horizontal berdasarkan *mode shape* dominan. Hasil perbandingan ini menjadi dasar untuk menyimpulkan sejauh mana gaya vertikal perlu dipertimbangkan dalam analisis awal dan desain jembatan, khususnya dalam konteks wilayah gempa tinggi di Indonesia. Penelitian ini bersifat eksploratif dan tidak melibatkan analisis nonlinear atau *time history*, namun bertujuan memberi gambaran kritis awal tentang potensi pengaruh gaya gempa vertikal yang sering diabaikan.

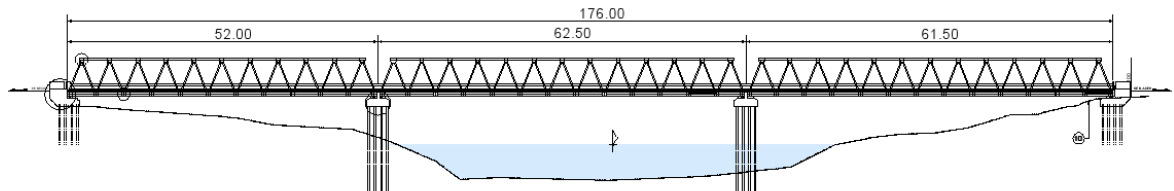


**Gambar 1.** Lokasi Jembatan Sei Wampu

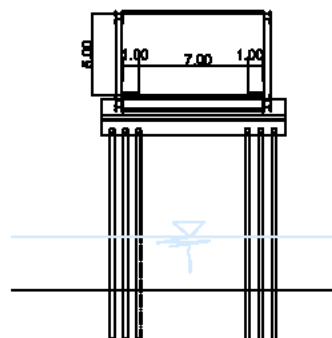
Sumber: Google Maps



**Gambar 2.** Tampak Atas Jembatan Sei Wampu



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



**Gambar 4.** Potongan C-C Jembatan Sei Wampu

## 2.1. Pemodelan Aplikasi ABAQUS

Dalam studi ini, ABAQUS CAE Student Version yang termasuk ke dalam ABAQUS Explicit merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis nilai frekuensi alami dan *mode shape* dari Jembatan Sei Wampu. Tahapan pemodelan di ABAQUS ini dimulai dengan mendesain jembatan yang terdiri dari penginputan material dan *section* jembatan. Pemodelan dilanjutkan dengan menggabungkan hasil input dan desain jembatan, membuat '*step*', membuat *boundary condition*, dan membuat '*job*'. Hasil inputan tersebut kemudian di submit untuk dilakukan analisis. Hasil analisis tersebut lalu di periksa kembali, jika '*error*' ditemukan maka dilakukan perbaikan sesuai dengan letak '*error*' jika tidak maka dilanjutkan dengan melihat hasil analisis. Hasil analisis tersebut nantinya akan menunjukkan nilai frekuensi alami jembatan, resultan *mode shape*, serta nilai *mode shape* pada tiap node. Namun, *mode shape* yang dihasilkan tersebut masih dalam bentuk *eigenvectors* sehingga dinormalkan terlebih dahulu dengan persamaan (1) [23], [24]. Penormalan *eigenvectors* tersebut dibantu menggunakan perangkat lunak Matlab.

$$\phi_{ABAQUS} = \frac{a_j}{\sqrt{\{a\}^T [M_s] \{a\}}} \quad (1)$$

Di mana:

$\phi_{ABAQUS}$  merupakan *mode shape*

$a_j$  merupakan nilai *eigenvectors* pada node ke- $j$

$\{a\}$  merupakan vektor *eigenvectors*

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

## 2.2. Perhitungan Gaya Inersia Akibat Beban Gempa

Perhitungan gaya inersia akibat beban gempa dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Memaparkan nilai massa tiap elemen dan nilai *mode shape* yang diperoleh dari nilai frekuensi alami.
2. Memasukkan nilai massa dan *mode shape* ke dalam persamaan (2).
3. Mendesain grafik respon spektra di permukaan berdasarkan SNI 2833:2016 dengan mengacu berdasarkan peta gempa Indonesia yang probabilitasnya terlampaui 7% dalam 75 tahun terakhir ( $PGA$ ,  $S_s$ , dan  $S_1$ ). Ketiga nilai tersebut diambil berdasarkan Gambar 5-7. Nilai tersebut lalu dikalikan dengan nilai faktor amplifikasi  $F_{PGA}$ ,  $F_a$ , dan  $F_v$  yang nilainya diambil berdasarkan kelas situs seperti pada Tabel 1-2. Persamaan perumusan respon spektra tersebut dapat dilihat pada persamaan (3)-(5). Selanjutnya hasil dari ketiga analisis tersebut dibentuk menjadi grafik respon spektra seperti Gambar 8.
4. Menghitung nilai periode getar struktur berdasarkan nilai frekuensi alami jembatan.
5. Memasukkan nilai periode getar struktur ke dalam grafik yang diperoleh dari langkah 3 sebelumnya.
6. Mensubstitusikan nilai gaya gempa yang diperoleh pada langkah 2 dengan nilai  $C_{sm}$  yang diperoleh dari Gambar 8 ke dalam persamaan (6).

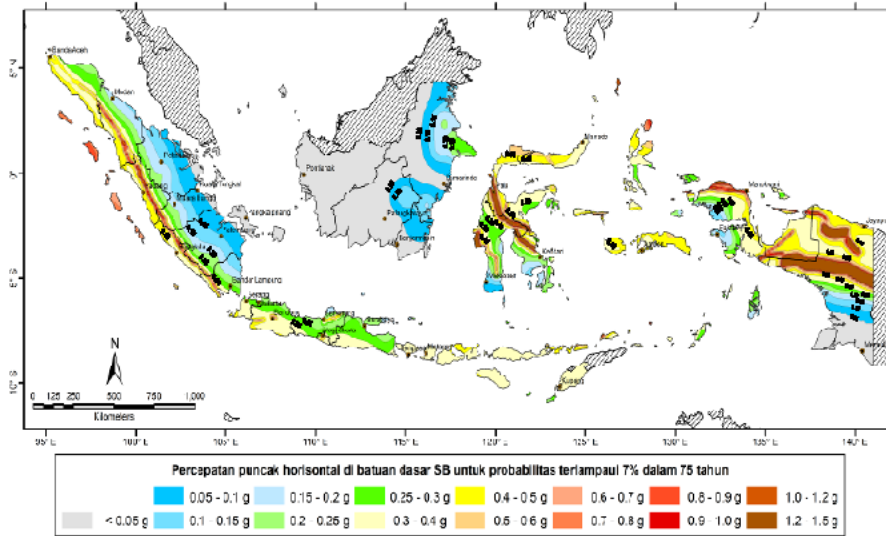
$$\Gamma_n = \frac{\left[ \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn} \right]^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2} \quad (2)$$

Di mana:

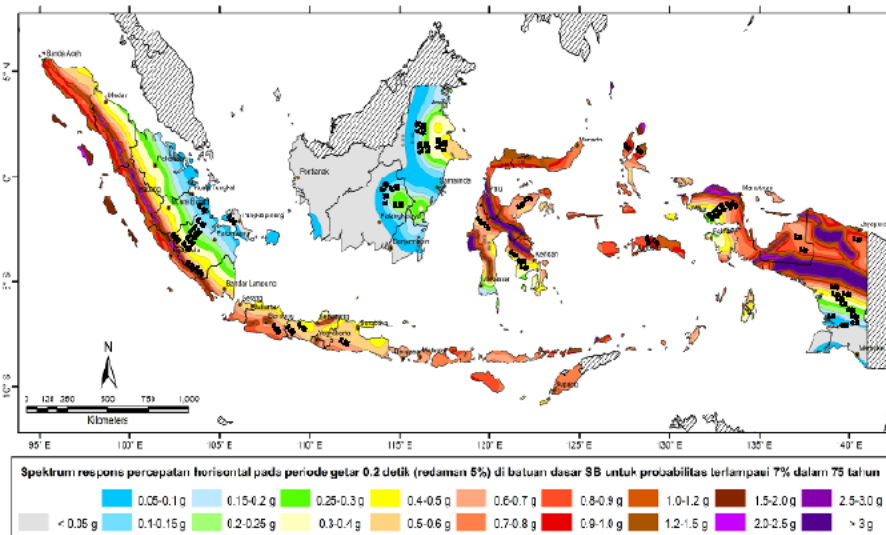
$\Gamma_n$  merupakan gaya inersia akibat beban gempa ke- $n$  (kN)

$m_j$  merupakan massa di  $j$  pada SDOF (kN.det<sup>2</sup>/cm)

$\phi_{jn}$  merupakan bentuk mode di  $j$  ke- $n$



**Gambar 5. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (PGA)**  
Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)

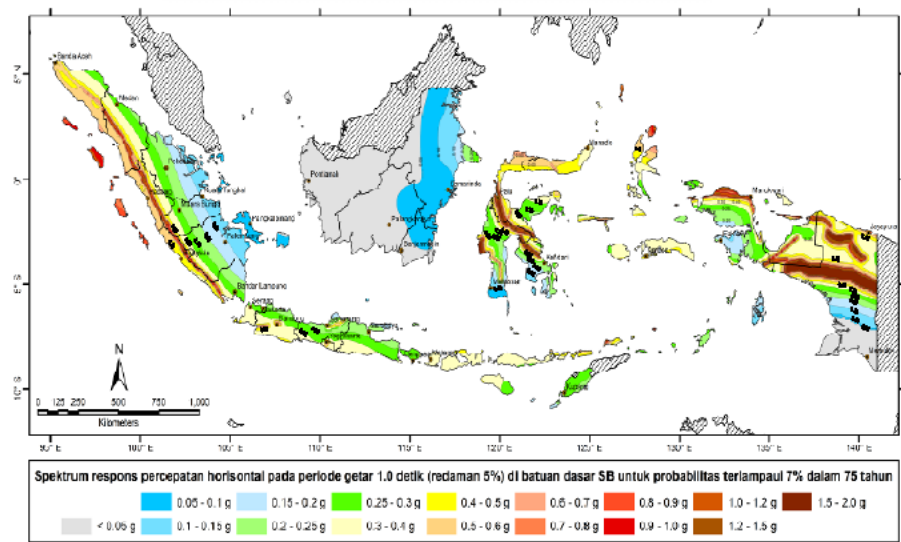


**Gambar 6. Peta Respon Spektra Percepatan 0,2 Detik di Batuan Dasar**  
Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)

Tabel 1. Nilai Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 0,2 Detik ( $F_{PGA}/F_s$ )

| Kelas situs       | PGA ≤ 0,1<br>$S_s \leq 0,25$ | PGA = 0,2<br>$S_s = 0,5$ | PGA = 0,3<br>$S_s = 0,75$ | PGA = 0,4<br>$S_s = 1,0$ | PGA ≥ 0,5<br>$S_s \geq 1,25$ |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Batuan Keras (SA) | 0,8                          | 0,8                      | 0,8                       | 0,8                      | 0,8                          |
| Batuan (SB)       | 1,0                          | 1,0                      | 1,0                       | 1,0                      | 1,0                          |
| Tanah Keras (SC)  | 1,2                          | 1,2                      | 1,1                       | 1,0                      | 1,0                          |
| tanah Sedang (SD) | 1,6                          | 1,4                      | 1,2                       | 1,1                      | 1,0                          |
| Tanah Lunak (SE)  | 2,5                          | 1,7                      | 1,2                       | 0,9                      | 0,9                          |
| Tanah Khusus (SF) | SS                           | SS                       | SS                        | SS                       | SS                           |

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)



Gambar 7. Peta Respon Spektra Percepatan 1 Detik di Batuan Dasar  
Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)

Tabel 2. Nilai Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 0,2 Detik ( $F_{PGA}/F_s$ )

| Kelas situs       | $S_1 \leq 0,1$ | $S_1 = 0,2$ | $S_1 = 0,3$ | $S_1 = 0,4$ | $S_1 \geq 0,5$ |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Batuan Keras (SA) | 0,8            | 0,8         | 0,8         | 0,8         | 0,8            |
| Batuan (SB)       | 1,0            | 1,0         | 1,0         | 1,0         | 1,0            |
| Tanah Keras (SC)  | 1,7            | 1,6         | 1,5         | 1,4         | 1,3            |
| tanah Sedang (SD) | 2,4            | 2,0         | 1,8         | 1,6         | 1,5            |
| Tanah Lunak (SE)  | 3,5            | 3,2         | 2,8         | 2,4         | 2,4            |
| Tanah Khusus (SF) | SS             | SS          | SS          | SS          | SS             |

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)

$A_s = F_{PGA} \times PGA$  (3)

$S_{DS} = F_a \times S_s$  (4)

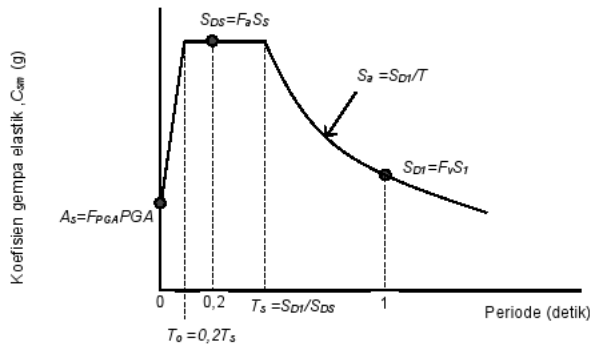
$S_{D1} = F_v \times S_1$  (5)

Di mana:

$A_s$  merupakan koefisien percepatan puncak muka tanah (g)

$S_{DS}$  merupakan nilai spektra permukaan tanah pada periode 0,2 detik (g)

$S_{D1}$  merupakan nilai spektra permukaan tanah pada periode 1 detik (g)



Gambar 8. Grafik Respon Spektra pada Permukaan Tanah  
Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2016)

$H_{E,1} = \Gamma_n C_{sm}$  (6)

Di mana:

$H_{E,1}$  merupakan besar gaya inersia akibat beban gempa pada jembatan pada lokasi jembatan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

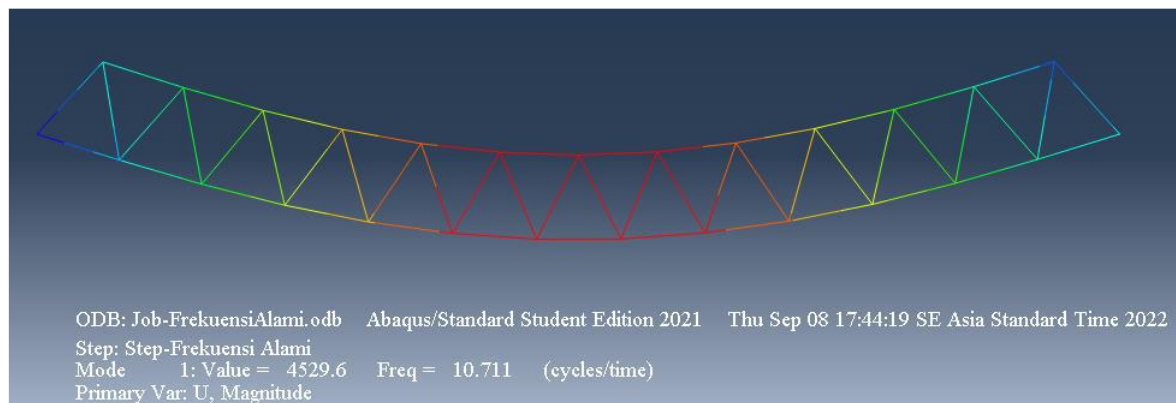
#### 3.1. Hasil Perhitungan Frekuensi Alami dan *Mode Shape* Pertama

Nilai frekuensi alami jembatan pada *mode* dominan (*mode* pertama) dari ABAQUS memiliki nilai sebesar  $\omega_{ABAQUS} = 10,711$  rad/det.

ABAQUS juga menunjukkan nilai *mode shape* pertama (*mode shape* dominan) dengan resultan *mode shape* sebesar 4529,6 dan nilai *mode shape* pertama pada tiap node. Nilai *mode shape* pertama pada tiap node tersebut dinormalkan dengan bantuan Matlab yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai frekuensi alami jembatan beserta *mode shape* pada mode pertama menggunakan ABAQUS dapat dilihat pada Gambar 9.

Tabel 3. *Mode Shape* Pertama

| <b>Mode Shape Pertama</b> |        |        |      |        |        |      |        |        |
|---------------------------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|
| 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 9. Nilai Frekuensi Alami dan *Mode Shape* Pertama

#### 3.2. Hasil Perhitungan Gaya Inersia Akibat Beban Gempa

Perhitungan gaya inersia akibat beban gempa dipengaruhi dua parameter, yaitu nilai massa dan nilai *mode shape*. Nilai massa yang digunakan dalam menganalisis gaya inersia akibat beban gempa dapat dilihat pada Tabel 4.

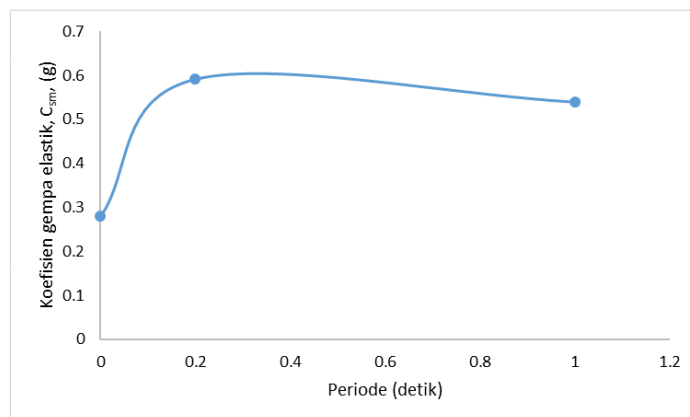
##### 3.2.1. Hasil Perhitungan Gaya Inersia Akibat Beban Gempa Arah Horizontal

Seperti yang disampaikan sebelumnya, nilai *mode shape* merupakan salah satu parameter dalam perhitungan gaya inersia akibat beban gempa. Untuk arah horizontal, maka nilai *mode shape* yang digunakan hanya nilai pada arah-x. Nilai *mode shape* pertama pada arah-x dapat di lihat pada Tabel 3.

Kedua nilai tersebut selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan (2) sehingga diperoleh nilai  $\Gamma_V = 136,957$ . Nilai tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (6) untuk memperoleh besar gaya inersia akibat beban gempa arah horizontal pada lokasi jembatan. Nilai  $C_{sm}$  pada persamaan tersebut merupakan nilai spektrum respon desain yang diperoleh dari grafik seperti Gambar 8. Grafik tersebut memerlukan nilai respon spektra yang diperoleh melalui persamaan (3)-(5), di mana nilai dari masing-masing persamaan tersebut adalah  $A_s = 0,28$  g,  $S_{DS} = 0,59$  g, dan  $S_{D1} = 0,54$  g. Ketiga nilai tersebut kemudian dibentuk ke dalam grafik yang hasilnya dapat di lihat pada Gambar 10.

Tabel 4. Nilai Massa

| Noda | Massa<br>(kN.det <sup>2</sup> /cm) | Noda | Massa<br>(kN.det <sup>2</sup> /cm) | Noda | Massa<br>(kN.det <sup>2</sup> /cm) |
|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|
| 1    | 3,343                              | 10   | 6,839                              | 19   | 6,699                              |
| 2    | 3,592                              | 11   | 6,592                              | 20   | 6,796                              |
| 3    | 5,560                              | 12   | 6,654                              | 21   | 6,407                              |
| 4    | 7,903                              | 13   | 7,276                              | 22   | 7,148                              |
| 5    | 7,428                              | 14   | 7,956                              | 23   | 6,901                              |
| 6    | 8,088                              | 15   | 7,740                              | 24   | 6,654                              |
| 7    | 7,243                              | 16   | 7,094                              | 25   | 6,407                              |
| 8    | 7,447                              | 17   | 6,407                              | 26   | 8,018                              |
| 9    | 6,407                              | 18   | 7,358                              | 27   | 8,039                              |



**Gambar 10.** Respon Spektra

Selanjutnya nilai respon spektra berdasarkan Gambar 10 tersebut diperoleh dengan menganalisis nilai periode getar struktur terlebih dahulu. Nilai periode getar struktur dapat diperoleh menggunakan persamaan (7).

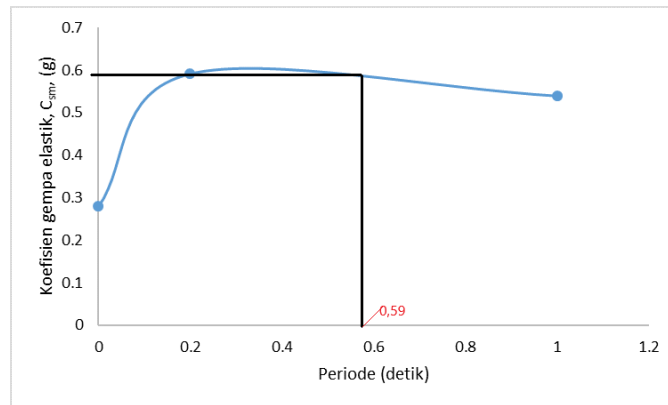
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (7)$$

Di mana:

$T$  merupakan periode getar struktur

$\omega$  merupakan frekuensi alami

Sebelumnya diketahui nilai frekuensi alami memiliki nilai sebesar  $\omega_{ABAQUS} = 10,711$  rad/det, sehingga nilai periode getar struktur diperoleh sebesar,  $T = 0,59$  detik. Nilai tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam Gambar 10, sehingga diperoleh nilai spektrum respon desain ( $C_{sm}$ ) sebesar 0,6 g seperti pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Koefisien Gempa Elastik,  $C_{sm}$  (g)

Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan nilai gravitasi sebesar  $9,8 \text{ m/s}^2$  sehingga nilai  $C_{sm}$  yang digunakan adalah  $5,88 \text{ m/s}^2$ . Nilai tersebut selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan (6), sehingga diperoleh besar gaya inersia akibat beban gempa pada arah horizontal pada lokasi jembatan sebesar,  $H_{E-V} = 805,31 \text{ kN}$ .

### 3.2.2. Hasil Perhitungan Gaya Inersia Akibat Beban Gempa Arah Vertikal

Sama halnya dengan gaya inersia akibat beban gempa arah vertikal, nilai *mode shape* merupakan salah satu parameter dalam perhitungan gaya inersia akibat beban gempa. Hanya saja untuk arah vertikal, maka nilai *mode shape* yang digunakan hanya nilai pada arah-y. Nilai *mode shape* pertama pada arah-y dapat di lihat pada Tabel 3.

Kedua nilai tersebut selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan (2) sehingga diperoleh nilai  $\Gamma_H = 138,056$ . Nilai tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (6) untuk memperoleh besar gaya inersia akibat beban gempa arah vertikal pada lokasi jembatan. Nilai  $C_{sm}$  pada persamaan tersebut merupakan nilai spektrum respon desain yang diperoleh dari grafik seperti Gambar 8. Melalui Gambar 11 sudah diketahui bahwa nilai  $C_{sm}$  memiliki nilai sebesar  $5,88 \text{ m/s}^2$ . Nilai tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (6) sehingga diperoleh besar gaya inersia akibat beban gempa pada arah vertikal pada lokasi jembatan sebesar,  $H_{E-H} = 811,77 \text{ kN}$ .

### 3.2.3. Kombinasi Pengaruh Gaya Inersia Akibat Beban Gempa

Berdasarkan Badan Standarisasi Nasional (2016), diketahui bahwa pada struktur jembatan, gaya inersia akibat beban gempa elastis harus dikombinasikan. Maka dari itu, gaya gempa elastis ditinjau melalui 2 tinjauan pembeban. Persamaan tinjauan pembeban tersebut dapat dilihat pada Persamaan (8) dan (9) berikut:

$$100\%H_{E-V} + 30\%H_{E-H} \quad (8)$$

$$100\%H_{E-H} + 30\%H_{E-V} \quad (9)$$

Di mana:

$H_{E-V}$  merupakan gaya inersia akibat beban gempa arah vertikal (kN)

$H_{E-H}$  merupakan gaya inersia akibat beban gempa arah horizontal (kN)

Berdasarkan kedua persamaan tersebut diperoleh kombinasi pengaruh gaya inersia akibat beban gempa sebesar:

$$100\%(811,31) + 30\%(805,31) = 1052,90 \text{ kN}$$

$$100\%(805,31) + 30\%(811,31) = 1048,70 \text{ kN}$$

### 3.3. Pembahasan

Analisis menggunakan ABAQUS yang dilakukan pada struktur Jembatan Sei Wampu menunjukkan bahwa *mode shape* dominan (*mode shape* pertama) memiliki frekuensi alami sebesar 10,711 rad/det dengan periode getar sekitar 0,59 detik. *Mode shape* dominan yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan ABAQUS tersebut menunjukkan distribusi deformasi terbesar pada arah longitudinal dan vertikal, yang selanjutnya menjadi dasar perhitungan gaya inersia akibat beban gempa pada arah horizontal dan vertikal. Nilai *mode shape* yang telah dinormalisasi digunakan bersama data massa nodal untuk menghitung gaya inersia sesuai dengan pendekatan spektrum respons elastis SNI 2833:2016.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya inersia akibat gempa horizontal ( $H_{E-H}$ ) adalah sebesar 805,31 kN, sedangkan gaya inersia akibat gempa vertikal ( $H_{E-V}$ ) mencapai 811,77 kN. Kedua nilai ini diperoleh berdasarkan nilai koefisien gempa elastik ( $C_{sm}$ ) sebesar 0,6 g atau setara dengan 5,88 m/s<sup>2</sup>, yang dihitung berdasarkan spektrum respons desain pada periode getar struktur. Fakta bahwa nilai gaya inersia vertikal sedikit lebih besar dibandingkan gaya horizontal menjadi temuan penting, karena bertentangan dengan asumsi umum bahwa pengaruh vertikal cenderung dapat diabaikan.

Secara normatif, SNI 2833:2016 mengatur bahwa gaya gempa elastik dari arah horizontal dan vertikal harus dikombinasikan dalam desain struktur jembatan. Dalam konteks ini, hasil perhitungan menunjukkan bahwa kontribusi gaya gempa vertikal memiliki signifikansi yang hampir setara dengan gaya gempa horizontal, terutama dalam mode dominan yang berperan besar dalam respons awal struktur. Hal ini menegaskan bahwa pengabaian komponen vertikal dalam analisis awal struktur dapat mengarah pada *underestimation* terhadap potensi gaya internal, khususnya pada struktur jembatan bentang panjang.

Temuan ini mengindikasikan bahwa untuk struktur seperti Jembatan Sei Wampu yang memiliki frekuensi rendah dan mode dominan dengan deformasi signifikan pada arah vertikal, gaya gempa vertikal tidak dapat diabaikan begitu saja. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat urgensi untuk mempertimbangkan gaya vertikal dalam tahap awal analisis desain seismik jembatan, baik dalam bentuk analisis modal maupun kombinasi pembebanan. Hasil ini juga dapat menjadi pertimbangan awal untuk pembaruan pedoman perencanaan seismik jembatan di Indonesia agar lebih adaptif terhadap kondisi aktual struktur dan karakteristik gempa wilayah setempat.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan gaya inersia akibat gempa vertikal dan horizontal berdasarkan *mode shape* dominan pada struktur Jembatan Sei Wampu. Berdasarkan hasil analisis modal linier menggunakan perangkat lunak ABAQUS, ditemukan bahwa frekuensi alami pada mode pertama adalah 10,711 rad/det dengan periode getar sebesar 0,59 detik, serta bentuk mode dominan menunjukkan deformasi signifikan pada arah longitudinal dan vertikal. Dari perhitungan gaya inersia berdasarkan spektrum respons gempa SNI 2833:2016, diperoleh nilai gaya gempa horizontal sebesar 805,31 kN dan gaya gempa vertikal sebesar 811,77 kN. Temuan ini menunjukkan bahwa gaya gempa vertikal memiliki kontribusi yang hampir setara, bahkan sedikit lebih besar dibanding gaya horizontal pada mode dominan, yang umumnya menjadi dasar perencanaan struktur.

Kesimpulan ini memberikan temuan baru bahwa pada jembatan bentang panjang dengan konfigurasi tertentu, gaya vertikal yang selama ini sering diabaikan ternyata dapat menjadi komponen dominan dalam gaya internal awal yang dialami struktur. Temuan ini dapat dikategorikan sebagai postulat baru dalam konteks evaluasi awal jembatan terhadap gempa, yaitu bahwa komponen vertikal harus secara eksplisit diperhitungkan dalam pembebanan elastik awal apabila struktur menunjukkan respons vertikal dominan pada mode pertama. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat pentingnya integrasi gaya gempa vertikal dalam analisis modal sebagai metode alternatif praktis dalam identifikasi potensi bahaya

seismik awal, terutama dalam tahap pradesain atau inspeksi seismik cepat terhadap jembatan eksisting.

Prospek pengembangan dari penelitian ini meliputi perluasan analisis terhadap mode-mode selanjutnya yang mungkin memiliki partisipasi massa signifikan, penerapan pendekatan nonlinear dinamik (*time history analysis*), serta validasi eksperimental atau monitoring dinamis lapangan untuk mengevaluasi kesesuaian prediksi numerik terhadap perilaku aktual jembatan. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi acuan awal dalam pengembangan model evaluasi risiko seismik berbasis mode dominan untuk jembatan di wilayah gawan gempa. Implikasi dari penelitian ini mendorong perlunya peninjauan ulang terhadap standar desain nasional, khususnya dalam hal pembobotan dan kombinasi gaya vertikal dalam perhitungan gempa elastik untuk struktur jembatan. Oleh karena itu, diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi akademisi, praktisi, dan perancang untuk lebih memperhatikan komponen vertikal dalam analisis awal dan penyusunan strategi mitigasi risiko gempa jembatan di Indonesia.

## Daftar Pustaka

- [1] A. Abo-El-Ezz, A. Farzam, H. Fezai, and M.-J. Nollet, "Scenario-based earthquake damage assessment of highway bridge networks," *Advances in Bridge Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 3, Mar. 2023, doi: 10.1186/s43251-023-00083-4.
- [2] R. Folić and M. Čokić, "SEISMIC ASSESSMENT OF THE DAMAGE LIMIT STATES OF EXISTING HIGHWAY BRIDGES," Mar. 2025, pp. 554–565. doi: 10.5592/CO/3CroCEE.2025.65.
- [3] K. T. Htay, J. Tanjung, Masrilayanti, M. Olivia, F. Mohamed Nazri, and M. Bur, "A Proposed Fragility Curve Based on PO-ID Hybrid Analysis for Seismic Assessment Performance of the Reinforced Concrete Continuous Bridges in Earthquake Prone Area," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3875, Dec. 2024, doi: 10.3390/buildings14123875.
- [4] G. Tan *et al.*, "A rapid evaluation method based on natural frequency for post-earthquake traffic capacity of small and medium span bridges," *Eng Struct*, vol. 280, p. 115681, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115681.
- [5] X. Wang, A. Shafieezadeh, and A. Ye, "Optimal EDPs for Post-Earthquake Damage Assessment of Extended Pile-Shaft-Supported Bridges Subjected to Transverse Spreading," *Earthquake Spectra*, vol. 35, no. 3, pp. 1367–1396, Aug. 2019, doi: 10.1193/090417EQS171M.
- [6] J. Rodríguez, S. Aldabagh, and M. S. Alam, "Loading protocols for quasi-static cyclic testing of flexure dominated reinforced concrete circular bridge columns under crustal, subcrustal, and subduction earthquakes," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 177, p. 108394, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108394.
- [7] H. Aryan and M. Ghassemieh, "Numerical assessment of vertical ground motion effects on highway bridges," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 47, no. 7, pp. 790–800, Jul. 2020, doi: 10.1139/cjce-2019-0096.
- [8] K. Benmahdi, N. Lahbari, N. Rahal, A. Demdoun, M. Sadoun, and H. Beghdad, "Effect of near-fault vertical seismic excitation on the response of long-span continuous deck truss bridges," *Vojnotehnicki glasnik*, vol. 72, no. 4, pp. 1889–1915, 2024, doi: 10.5937/vojtehg72-49228.
- [9] S. Maleki, "Effects of Vertical Component of Earthquakes on Cable-Stayed Bridges," *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, vol. 8, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.33552/CTCSE.2022.08.000685.
- [10] G. Falsone, A. Recupero, and N. Spinella, "Effects of near-fault earthquakes on existing bridge performances," *J Civ Struct Health Monit*, vol. 10, no. 1, pp. 165–176, Feb. 2020, doi: 10.1007/s13349-020-00378-4.
- [11] H. Wibowo and S. Sritharan, "Effects of vertical ground acceleration on the seismic moment demand of bridge superstructure connections," *Eng Struct*, vol. 253, p. 113820, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113820.

- [12] W. An and G. Song, "Transient Response of Bridge Piers to Structure Separation under Near-Fault Vertical Earthquake," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 4068, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11094068.
- [13] M. Liao, B. Wu, X. Zeng, and K. Deng, "Incremental dynamic analysis of the long-span continuous beam bridge considering the fluctuating frictional force of rubber bearing," *Advances in Bridge Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 19, Dec. 2021, doi: 10.1186/s43251-021-00041-y.
- [14] G. Shid, M. R. Shiravand, and S. Mahboubi, "Direction effect of vertical ground motion on seismic damages of friction-based isolated RC piers," *Advances in Bridge Engineering*, vol. 6, no. 1, p. 9, Feb. 2025, doi: 10.1186/s43251-024-00154-0.
- [15] S. Tamaddon, M. Hosseini, and A. Vasseghi, "Effect of Non-Uniform Vertical Excitations on Vertical Pounding Phenomenon in Continuous-Deck Curved Box Girder RC Bridges Subjected to Near-Source Earthquakes," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 5360–5383, Jul. 2022, doi: 10.1080/13632469.2021.1871681.
- [16] L. Zhang and W. Zhang, "Influence of structural parameters on the vertical pounding between girder and pier in unequal-span girder bridges under near-fault vertical ground motions," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 9740, Mar. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-93983-6.
- [17] S. Farahmand-Tabar and M. Barghian, "Seismic assessment of a cable-stayed arch bridge under three-component orthotropic earthquake excitation," *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 227–242, Jan. 2021, doi: 10.1177/1369433220948756.
- [18] X. Jian, Y. Xia, and L. Sun, "An indirect method for bridge mode shapes identification based on wavelet analysis," *Struct Control Health Monit*, vol. 27, no. 12, Dec. 2020, doi: 10.1002/stc.2630.
- [19] H. S. Kaushal, Er. H. Sharma, Dr. S. K. Chandel, Er. S. Kumar, and Er. M. Bala, "Structural Stability Analysis of Bridge Structure Using FEA," *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, vol. 10, no. 4, pp. 152–155, Aug. 2023, doi: 10.55524/ijirem.2023.10.4.19.
- [20] Z. Nie, Z. Shen, J. Li, H. Hao, Y. Lin, and H. Ma, "Output-only complete mode shape identification of bridges using a limited number of sensors," *Mech Syst Signal Process*, vol. 178, p. 109246, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109246.
- [21] X. Zhang, Y. Wang, M. Liu, Y. Cao, S. Chen, and D. Cao, "Nonlinear dynamical modeling and response analysis of complex structures based on assumed mode weighting," *Eng Struct*, vol. 312, p. 118226, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118226.
- [22] M. Nasution, "Analysis of the Effect of Earthquake Loads on the Response of Cable Stayed Bridges," *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 4, no. 1, pp. 61–71, Jun. 2023, doi: 10.37253/jcep.v4i1.7466.
- [23] ABAQUS Inc., "ABAQUS Analysis User's Manual." [Online]. Available: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/popups/usb-lgl.html>
- [24] M. Paz, *Dinamika Struktur*, 2nd ed. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 1996.