STUDI PERBANDINGAN PENGARUH VARIASI BENTUK LENGKUNG TERHADAP STABILITAS STRUKTUR JEMBATAN PELENGKUNG STUDI KASUS MODEL KOMPETISI JEMBATAN INDONESIA XIX TAHUN 2024

Legat Bestari[1], Ester Priskasari[2], dan Hadi Surya Wibawanto Sunarwadi[3]

[1]Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sudimoro Malang
Email: bestarilegat2@gmail.com
[2] Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Parikesit 45 Malang
Email: esterpriskasari@gmail.com
[3]Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Perum Joyo Grand Kav. A-22 Malang
Email: hadiwibawanto@lecturer.itn.ac.id

ABSTRACT

Arch bridges represent a widely favoured structural form, celebrated for their inherent efficiency and aesthetic appeal. Variations in arch geometry, such as circular and parabolic shapes, exert a significant influence on both the structural stability and load distribution within the design. This research endeavours to conduct a comparative analysis of how distinct arch geometries—specifically circular and parabolic—impact the structural stability of arch bridges. The investigation centres on a case study utilising a model arch bridge from the 19th Indonesian Bridge Competition (KJI) in 2024. The methodology employed involves structural analysis facilitated by SAP2000 v.24 software, adhering strictly to the guidelines set forth by KJI XIX 2024 and SNI 1729:2020 for comprehensive evaluation. Key parameters subjected to analysis included internal forces, stress, strain, deflection, and material efficiency. The analytical findings reveal that the bridge model incorporating a parabolic arch demonstrates superior performance. While the maximum axial forces in the arch rib and hangers were higher in the parabolic model, this model exhibited substantially lower bending moments in the arch rib (45.36 kNmm) and longitudinal girder (32.55 kNmm) when compared to the circular arch model (86.51 kNmm and 87.41 kNmm). Furthermore, the maximum deflection observed in the parabolic model (1.75 mm) was notably less than that of the circular model (2.21 mm). In terms of material consumption, the parabolic arch bridge model proved more efficient, with a total weight of 19.19 kg, making it 51.9% lighter than the circular arch bridge model, which weighed 37 kg. In conclusion, the parabolic arch form imparts enhanced structural stability and greater material efficiency, proving more effective in channelling loads primarily into pure compressive forces, thereby mitigating overall bending moments and deformations.

Keywords: Arch Bridge, Arch Shape Variation, Indonesian Bridge Competition, Structural Stability, SAP2000

ABSTRAK

Jembatan pelengkung merupakan salah satu struktur yang populer karena efisiensi dan estetikanya. Variasi bentuk lengkung, seperti lingkaran dan parabola, secara signifikan memengaruhi stabilitas dan distribusi beban pada struktur. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh variasi bentuk lengkung lingkaran dan parabola terhadap stabilitas struktur jembatan pelengkung. Studi kasus yang digunakan adalah model Jembatan Pelengkung dari Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX Tahun 2024. Metode yang digunakan adalah analisis struktur dengan software SAP2000 v.24 untuk memodelkan dua variasi jembatan. Analisis ini mengacu pada Pedoman KJI XIX 2024 dan SNI 1729:2020 untuk evaluasi. Parameter yang dianalisis meliputi gaya-gaya dalam (aksial, geser, momen lentur), tegangan, regangan, lendutan, dan efisiensi material. Hasil analisis menunjukkan bahwa model jembatan dengan lengkung parabola memiliki performa yang lebih unggul. Meskipun gaya aksial maksimum pada beberapa komponen lebih tinggi, model ini menunjukkan momen lentur yang jauh lebih rendah pada pelengkung utama (45,36 kNmm) dan gelagar memanjang (32,55 kNmm) dibandingkan model lingkaran. Selain itu, lendutan maksimum pada model parabola (1,75 mm) lebih kecil dibandingkan model lingkaran (2,21 mm). Dari segi material, model parabola terbukti lebih efisien dengan total berat 19,19 kg, atau 51,9% lebih ringan dari model lingkaran. Kesimpulannya, bentuk lengkung parabola memberikan stabilitas struktur yang lebih baik dan efisiensi material yang lebih tinggi untuk jembatan pelengkung dalam studi kasus ini.

Kata kunci: Jembatan Pelengkung, Variasi Bentuk Lengkung, Kompetisi Jembatan Indonesia, Stabilitas Struktur, SAP2000

1. PENDAHULUAN

Jembatan pelengkung adalah salah satu jenis struktur yang populer karena efisiensi material dan nilai estetika yang ditawarkannya. Struktur ini bekerja dengan menyalurkan beban secara efektif melalui bentuk lengkung ke tumpuan, sehingga momen lentur yang bekerja pada jembatan dapat diminimalisir. Geometri atau bentuk lengkung, seperti lingkaran dan parabola, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi beban dan stabilitas struktur secara keseluruhan.

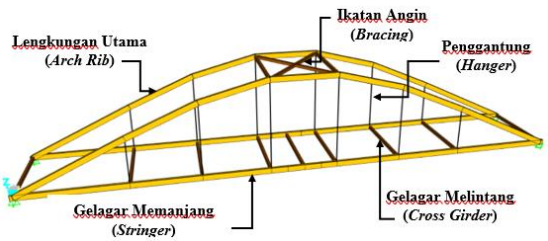
Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 menjadi platform bagi mahasiswa teknik sipil untuk berinovasi dalam merancang model jembatan yang efisien dan stabil. Dalam kompetisi ini, peserta ditantang untuk mencapai stabilitas dan efisiensi material yang optimal melalui berbagai variasi desain.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan pengaruh variasi bentuk lengkung (lingkaran dan parabola) terhadap stabilitas struktur jembatan pelengkung. Dengan menggunakan data dan model dari KJI XIX 2024, penelitian ini akan menganalisis bentuk lengkung mana yang memberikan kinerja paling optimum ditinjau dari stabilitas, efisiensi material, dan distribusi beban. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan desain jembatan pelengkung yang lebih efisien dan stabil..

2. TINJAUAN PUSTAKA

Jembatan Pelengkung Terikat (*Tied Arch Bridge*)

Struktur jembatan pelengkung terikat (*tied arch bridge*) didesain dengan menggabungkan antara lengkungan utama (*arch rib*), gelagar memanjang (*stringer*), gelagar melintang (*cross girder*), dan ikatan angin (*bracing*) yang didukung oleh kabel penggantung (*hanger*). Lengkungan utama (*arch rib*) menahan beban vertikal dan menghasilkan gaya horizontal yang ditahan oleh kabel penggantung (*hanger*) pada setiap segmen lengkungan. Dek jembatan didukung oleh kabel penggantung (*hanger*) yang mentransfer beban ke gelagar memanjang (*stringer*) yang langsung terhubung pada pondasi atau abutmen dibawah jembatan

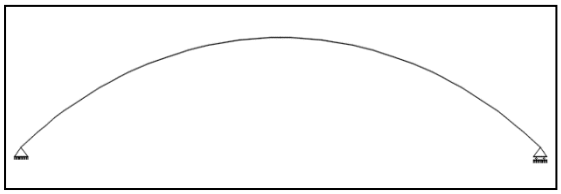


Gambar 1. Komponen Struktur Jembatan

Variasi Bentuk Lengkung

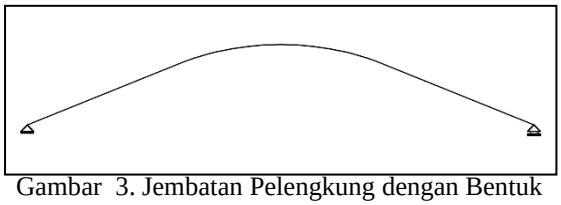
Dua bentuk lengkung yang umum digunakan dan dianalisis dalam penelitian ini adalah:

- **Lengkung Lingkaran**
  Bentuk ini memiliki radius yang konstan, membentuk busur lingkaran yang sempurna. Keunggulannya adalah kesederhanaan dalam desain dan konstruksi karena geometrinya yang seragam. Namun, pada beban yang tidak merata, lengkung lingkaran cenderung menghasilkan momen lentur yang lebih besar.



Gambar 2. Jembatan Pelengkung dengan Bentuk Lengkung Lingkaran

- **Lengkung Parabola**
  Bentuk ini mengikuti kurva matematis parabola, yang secara alami menyesuaikan diri dengan garis gaya tekan (compression line) dari beban terdistribusi seragam. Hal ini membuat lengkung parabola sangat efisien dalam meminimalkan momen lentur dan memaksimalkan efisiensi material.



Gambar 3. Jembatan Pelengkung dengan Bentuk Lengkung Parabola

Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan berbagai kemungkinan gaya atau beban yang bekerja secara bersamaan pada jembatan, perlu ditentukan kombinasi yang tepat untuk mengidentifikasi beban-beban yang memengaruhi perilaku struktur secara signifikan. Dalam penelitian ini, kombinasi pembebanan dianalisis berdasarkan keadaan batas kekuatan.

Keadaan batas kekuatan diterapkan untuk memastikan bahwa jembatan memiliki kekuatan dan stabilitas yang memadai dalam menahan berbagai

kombinasi beban selama masa layan. Kombinasi pembebanan serta nilai factor beban yang digunakan mengacu pada Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kombinasi Pembebanan dan Nilai Faktor Beban

Kelompok Pembebanan		Faktor Beban
Beban Mati	*DL*	1,10
Beban Hidup	*LL*	1,00

3. METODOLOGI PENELITIAN

Data Perencanaan dan Pemodelan

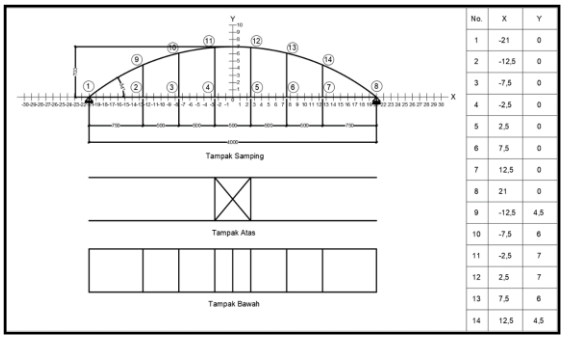
Data utama perencanaan mengacu pada Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 untuk kategori Jembatan Model Pelengkung. Spesifikasi utama jembatan adalah sebagai berikut:

1. Tipe Jembatan : Pelengkung Terikat (*Tied Arch Bridge*)
2. Panjang Jembatan (L) : 4000 mm
3. Tinggi Busur (f) : 700 mm
4. Lebar Jembatan : 600 mm
5. Material Utama : Profil *Hollow* (BJ 34) , Kawat Seling (Kelas 1570), dan Baut (A325)

Dua model jembatan dengan variasi bentuk lengkung yang berbeda dimodelkan menggunakan *software* SAP2000 v.24:

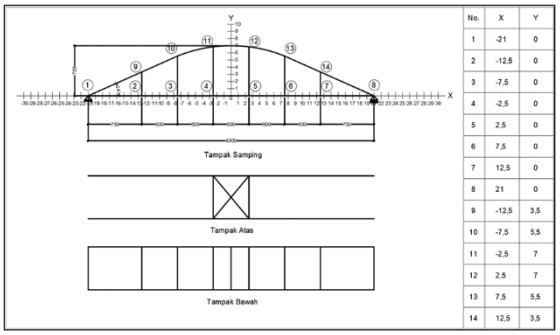
Tabel 2. Variasi Model Jembatan Berdasarkan Bentuk Lengkung

Model Jembatan	Sudut Lengkung	*f* (mm)	*L* (mm)	*L/f*
Lengkung Lingkaran	34°	700	4000	5,71
Lengkung Parabola	24°	700	4000	5,71



No.	X	Y
1	-21	0
2	-12,5	0
3	-7,5	0
4	-2,5	0
5	2,5	0
6	7,5	0
7	12,5	0
8	21	0
9	-12,5	4,5
10	-7,5	6
11	-2,5	7
12	2,5	7
13	7,5	6
14	12,5	4,5

Gambar 5. Titik Koordinat dan Model Jembatan Lengkung Lingkaran



No.	X	Y
1	-21	0
2	-12,5	0
3	-7,5	0
4	-2,5	0
5	2,5	0
6	7,5	0
7	12,5	0
8	21	0
9	-12,5	3,5
10	-7,5	5,5
11	-2,5	7
12	2,5	7
13	7,5	5,5
14	12,5	3,5

Gambar 6. Titik Koordinat dan Model Jembatan Lengkung Parabola

Analisis dan Parameter Evaluasi

Analisis struktur dilakukan dengan memberikan pembebanan sesuai pedoman KJI, yant terdiri dari:

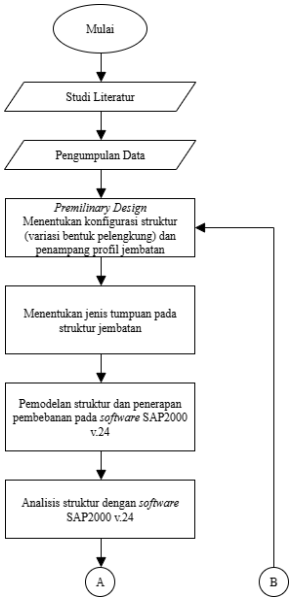
- **Beban Mati (DL):** Berat sendiri struktur yang dihitung otomatis oleh *software* SAP2000.
- **Beban Hidup (LL):** Beban terpusat dari pelat baja seberat 250 kg di tengah bentang.

Kombinasi pembebanan yang digunakan adalah 1.1 DL + 1.0 LL, sesuai pedoman kompetisi. Parameter stabilitas dan kinerja yang dianalisis meliputi:

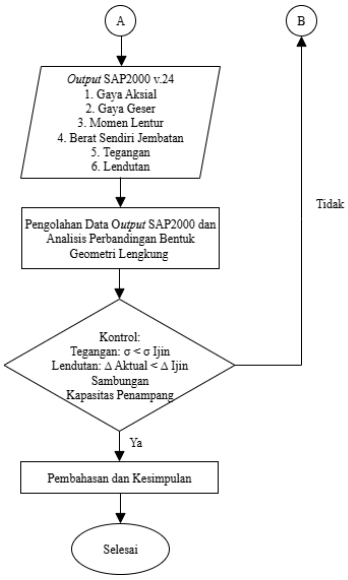
- **Gaya-gaya Dalam:** Gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur pada komponen utama.
- **Lendutan:** Deformasi vertikal maksimum di tengah bentang.
- **Tegangan dan Regangan:** Untuk mengevaluasi respons material.
- **Efisiensi Material:** Dihitung berdasarkan berat total struktur dari masing-masing model.

Seluruh hasil *output* dari *software* SAP2000 diverifikasi dengan perhitungan kontrol manual berdasarkan SNI 1729:2020 (Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural).

Bagan alir



Gambar 7. Bagan alir



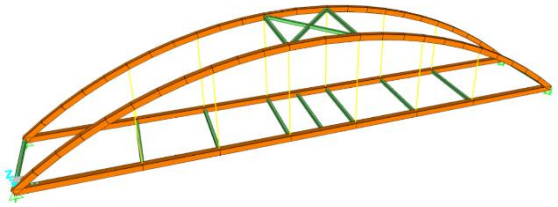
Gambar 8. (lanjutan) Bagan alir

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

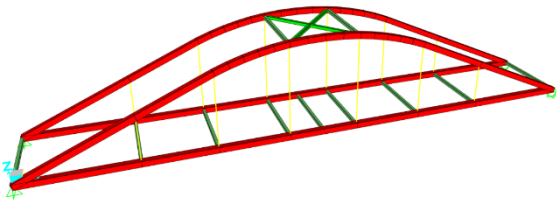
Perencanaan Struktur

Analisis struktur jembatan dilakukan untuk menentukan respons struktural atau gaya-gaya dalam yang terjadi pada jembatan. Respons struktural yang dianalisis meliputi gaya aksial, gaya geser, momen, lendutan, regangan, dan tegangan. Selanjutnya, respons struktural tersebut digunakan sebagai parameter untuk membandingkan pengaruh variasi bentuk lengkung terhadap stabilitas strukturnya. Analisis struktur dan pemodelan jembatan dilakukan menggunakan *software* SAP2000 v.24. Hasil *output* yang diperoleh kemudian akan diolah dalam perhitungan struktur menggunakan Microsoft Excel.

Panduan yang digunakan dalam analisis dan perhitungan struktur ini mengacu pada SNI 1729:2020. Studi kasus dalam penelitian ini adalah Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 dengan tipe jembatan pelengkung terikat (*tied arch bridge*).



Gambar 9. Pemodelan Jembatan dengan Bentuk Lengkung Lingkaran pada *software* SAP2000

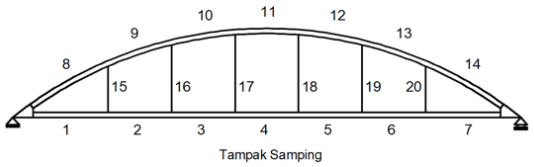


Gambar 10. Pemodelan Jembatan dengan Bentuk Lengkung Parabola pada *software* SAP2000

Analisis Struktur Jembatan

Analisis Struktur pada Jembatan menggunakan *software* SAP2000 v.24 untuk menghasilkan gaya-gaya dalam, tegangan, dan lendutan yang terjadi pada komponen struktur jembatan. Data hasil analisis *software* SAP2000 yang digunakan adalah nilai maksimum dari setiap gaya dalam, tegangan, dan lendutan.

Untuk memudahkan tinjauan pada analisis struktur jembatan, pada penelitian ini bentuk pelengkung dimodelkan sebagai penomoran batang agar mendekati bentuk asli yang ditinjau.



Gambar 11. Penomoran Batang Komponen Struktur Jembatan

Desain Penampang Struktur Jembatan

Komponen struktur jembatan dirancang dengan memanfaatkan penampang profil baja (*frame section*) yang tersedia dalam *software* SAP2000 v.24. Profil baja yang dipilih adalah jenis *Hollow*.

Pemilihan penampang profil ini mengacu pada standar SNI 1729:2020. Proses penentuan penampang dilakukan melalui metode *trial and error*, dan setiap batang diperiksa kekuatannya secara individual untuk memastikan tidak terjadi *overstress* atau kondisi yang tidak aman. Berikut adalah desain penampang profil pada komponen struktur jembatan yang dapat dilihat sebagai berikut:

- **Model Jembatan Lengkung Lingkaran**

1. Pelengkung Utama : *Hollow* 40×40×1,6
2. Gelagar Memanjang : *Hollow* 40×40×1,6
3. Gelagar Melintang : *Hollow* 20×20×1
4. Ikatan Angin : *Hollow* 20×20×1
5. Penggantung : *Wire Rope 1 mm*

- **Model Jembatan Lengkung Parabola**

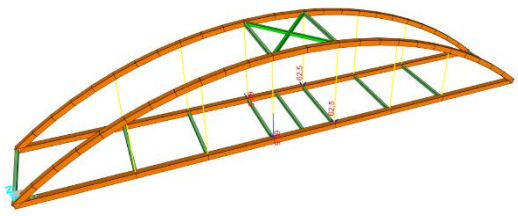
1. Pelengkung Utama : *Hollow* 40×40×0,7
2. Gelagar Memanjang : *Hollow* 40×40×0,7
3. Gelagar Melintang : *Hollow* 20×20×1
4. Ikatan Angin : *Hollow* 20×20×1
5. Penggantung : *Wire Rope 1 mm*

Pembebanan Struktur Jembatan

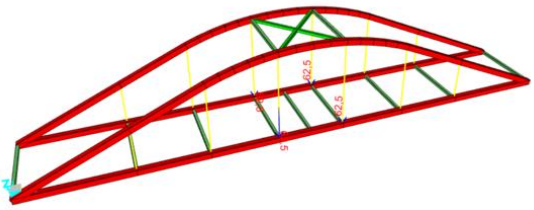
Dalam penelitian ini, pembebanan jembatan mengikuti Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024. Beban yang diterapkan terbagi menjadi dua kategori, yaitu beban mati (*DL*) dan beban hidup (*LL*). Beban mati (*DL*) pada jembatan dihasilkan dari berat strukturnya sendiri, sedangkan beban hidup (*LL*) berupa pelat baja seberat 250 kg yang ditempatkan secara terpusat di tengah bentang jembatan.

Tabel 3. Perhitungan Berat Sendiri pada *software* SAP2000

Komponen	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	Berat (Kgf)	Berat (kN)	Berat (Kgf)	Berat (kN)
Pelengkung Utama (*Arch Rib*)	16,66	0,163	7,38	0,072
Gelagar Memanjang (*Stringer*)	15,43	0,151	6,91	0,068
Gelagar Melintang (*Cross Girder*)	3,94	0,039	3,94	0,039
Ikatan Angin (*Bracing*)	0,93	0,009	0,93	0,009
Penggantung (*Hanger*)	0,04	0,00039	0,03	0,00038
Total	**37**	**0,362**	**19,19**	**0,188**



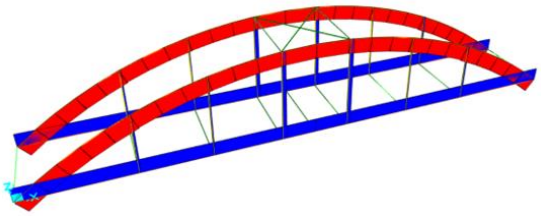
Gambar 12. Distribusi Beban Hidup (*LL*) pada Jembatan Lengkung Lingkaran



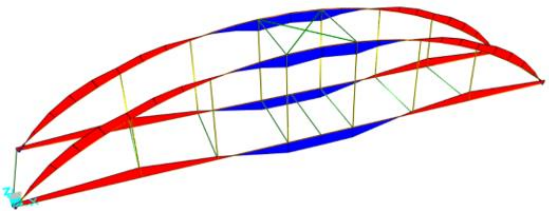
Gambar 13. Distribusi Beban Hidup (*LL*) pada Jembatan Lengkung Parabola

Hasil Analisis Jembatan dengan Bentuk Lengkung Lingkaran dan Lengkung Parabola

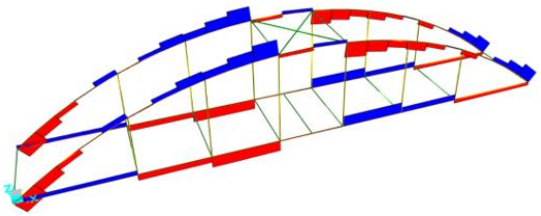
Berikut ini adalah visualisasi diagram yang terjadi pada model jembatan dengan bentuk lengkung lingkaran dan lengkung parabola yang meliputi gaya aksial atau *normal force diagram*, gaya geser atau *shear force diagram*, momen lentur atau *bending moment diagram*, tegangan atau *stress diagram*, dan lendutan atau *deflection*. Diagram-diagram hasil dari kombinasi pembebanan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.analisis *software* SAP2000 yang digunakan adalah nilai maksimum dari setiap gaya dalam, tegangan, dan lendutan.



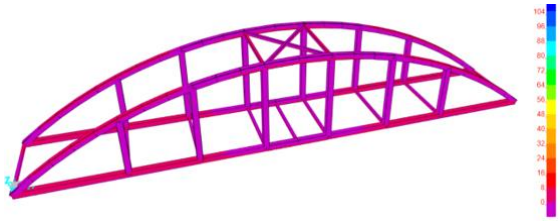
Gambar 14. *Normal Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



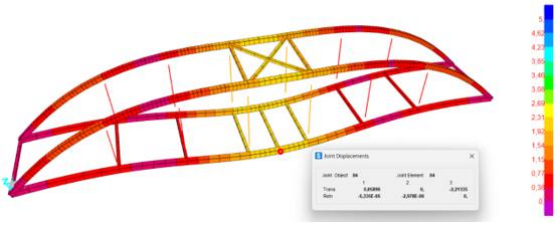
Gambar 15. *Bending Moment Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



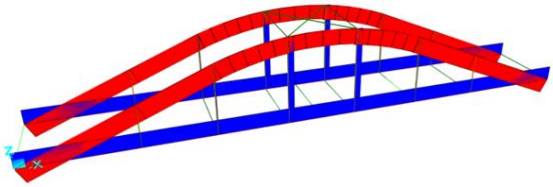
Gambar 16. *Shear Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



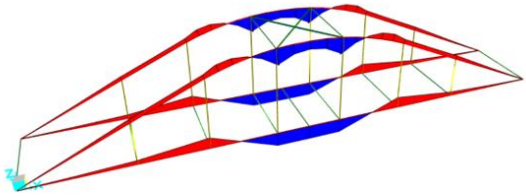
Gambar 17. *Stress Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



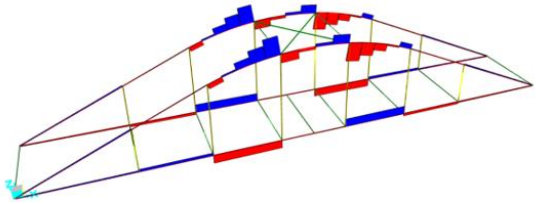
Gambar 18. *Deflection* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



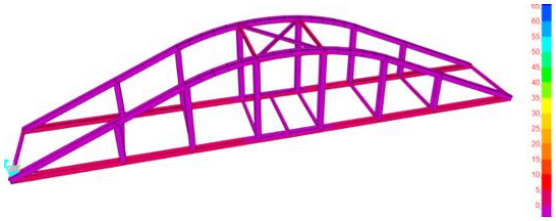
Gambar 19. *Normal Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



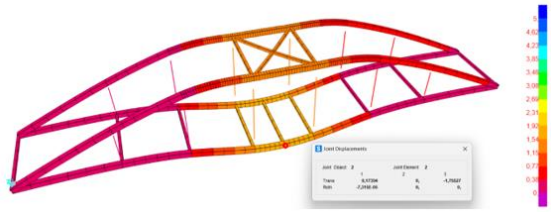
Gambar 20. *Bending Moment Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



Gambar 21. *Shear Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola

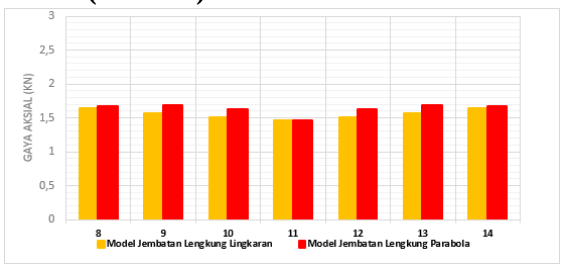


Gambar 22. *Stress Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



Gambar 23. *Deflection* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola

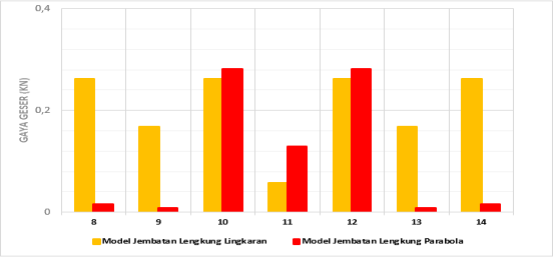
Perbandingan Gaya Aksial pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 24. Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan gaya aksial pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada Gambar 24. Gaya aksial maksimum terbesar terjadi di batang 9 dan batang 13 pada model jembatan lengkung parabola serta batang 8 dan batang 14 pada model jembatan lengkung lingkaran , yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola memiliki gaya aksial maksimum terbesar, yaitu sebesar -1,674 kN. Nilai gaya aksial maksimum cenderung lebih tinggi pada model jembatan lengkung parabola dan mengalami penurunan secara bertahap dari ujung batang menuju tengah batang. Gambar 24 menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

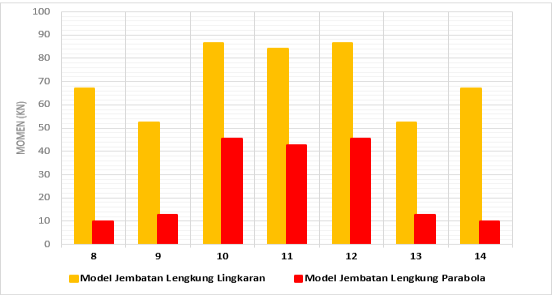
Perbandingan Gaya Geser pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 25. Grafik Perbandingan Gaya Geser pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan gaya geser pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada Gambar 25. Gaya geser maksimum terbesar terjadi pada batang 10 dan batang 12 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola memiliki gaya geser maksimum terbesar, yaitu sebesar 0,281 kN. Pola perubahan gaya geser pada kedua model jembatan menunjukkan fluktuasi dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 25 menunjukkan bahwa gaya geser pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda

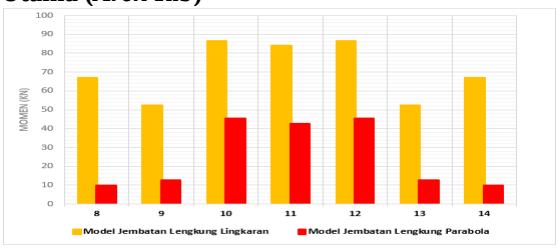
Perbandingan Momen Lentur pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 26. Grafik Perbandingan Momen Lentur pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan momen lentur pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada Gambar 26. Momen maksimum terbesar terjadi pada batang 10 dan batang 12 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung lingkaran memiliki momen lentur maksimum terbesar, yaitu sebesar 86,51 kN. Pola perubahan momen lentur pada model jembatan lengkung lingkaran menunjukkan fluktuasi dari ujung batang ke tengah batang, sedangkan pada model jembatan lengkung parabola, momen lentur cenderung meningkat secara signifikan dari batang 8 hingga batang 10, kemudian menurun di batang 11. Gambar 26 menunjukkan bahwa momen lentur pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

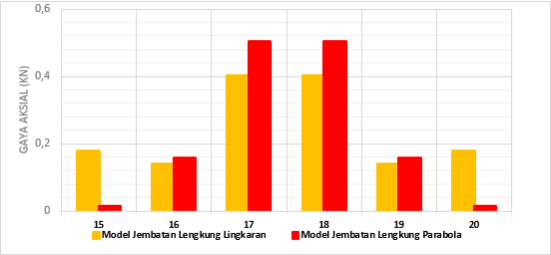
Perbandingan Tegangan pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 27. Grafik Perbandingan Momen Lentur pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan tegangan pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada Gambar 27. tegangan maksimum terbesar terjadi di batang 10 dan batang 12 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung lingkaran memiliki tegangan maksimum terbesar, yaitu sebesar 22,56 MPa. Pola perubahan tegangan pada kedua model jembatan menunjukkan fluktuasi yang berbeda dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 27 menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

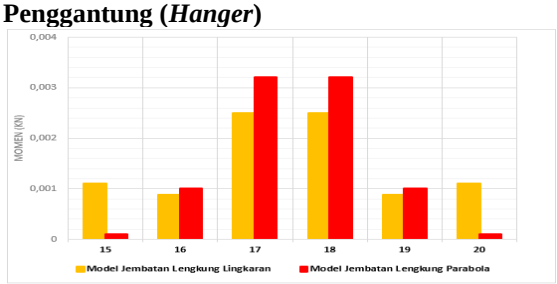
Perbandingan Gaya Aksial pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 28. Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan gaya aksial pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada Gambar 28. Gaya aksial maksimum terbesar terjadi pada batang 17 dan batang 18 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola memiliki gaya aksial maksimum terbesar, yaitu sebesar 0,504 kN. Nilai gaya aksial maksimum cenderung lebih tinggi pada model jembatan lengkung parabola dan mengalami fluktuasi pada setiap batang. Gambar 28 menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

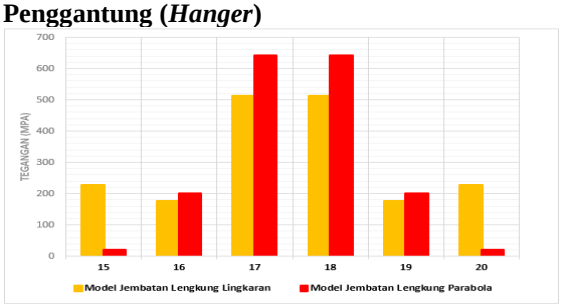
Perbandingan Regangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 29. Grafik Perbandingan Regangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan regangan pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada Gambar 29. Regangan maksimum terbesar terjadi pada batang 17 dan batang 18 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola memiliki regangan maksimum terbesar, yaitu sebesar 0,0032. Pola perubahan regangan pada kedua model jembatan menunjukkan fluktuasi dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 29 menunjukkan bahwa regangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

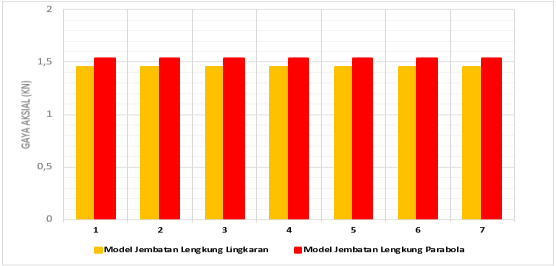
Perbandingan Tegangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 30. Grafik Perbandingan Tegangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan tegangan pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada Gambar 30. tegangan maksimum terbesar terjadi pada batang 17 dan batang 18 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola memiliki tegangan maksimum terbesar, yaitu sebesar 641,69 MPa. Pola perubahan tegangan pada kedua model jembatan menunjukkan fluktuasi dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 30 menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

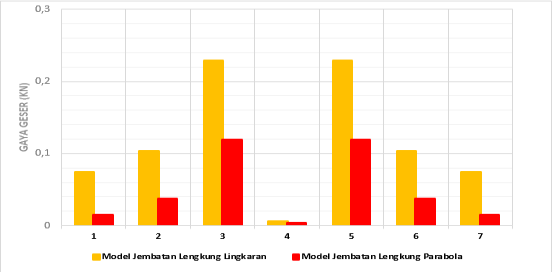
Perbandingan Gaya Aksial pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 31. Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan gaya aksial pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada Gambar 30. Gaya aksial terbagi merata pada masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, jembatan lengkung parabola memiliki gaya aksial maksimum terbesar, yaitu sebesar 1,531 kN. Nilai. Gambar 30 menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

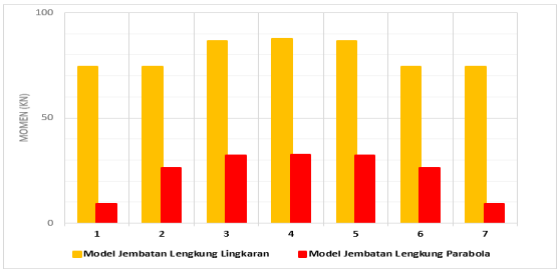
Perbandingan Gaya Geser pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 32. Grafik Perbandingan Gaya Geser pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan gaya geser pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada Gambar 32. Gaya geser maksimum terbesar terjadi pada batang 3 dan batang 5 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung lingkaran memiliki gaya geser maksimum terbesar, yaitu sebesar 0,229 kN. Pola perubahan gaya geser pada kedua model jembatan menunjukkan peningkatan yang signifikan pada batang 1-3 dan batang 5-7 serta penurunan yang signifikan pada batang 4. Gambar 32 menunjukkan bahwa gaya geser pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

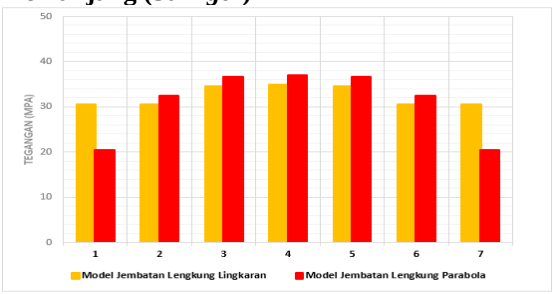
Perbandingan Momen Lentur pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 33. Grafik Perbandingan Momen Lentur pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan momen lentur pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada Gambar 33. Momen maksimum terbesar terjadi pada batang 4 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung lingkaran memiliki momen lentur maksimum terbesar, yaitu sebesar 87,41 kN. Pola perubahan momen lentur pada kedua model jembatan memiliki *trend* peningkatan dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 33 menunjukkan bahwa momen lentur pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

Perbandingan Tegangan pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

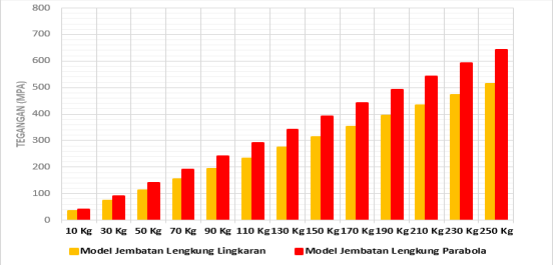


Gambar 34. Grafik Perbandingan Tegangan pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan tegangan pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada Gambar 34. tegangan maksimum terbesar terjadi pada batang 4 untuk masing-masing model jembatan, yang disebabkan oleh kombinasi beban berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. Di antara kedua model jembatan, model jembatan lengkung parabola

memiliki tegangan maksimum terbesar, yaitu sebesar 36,88 MPa. perubahan tegangan pada model jembatan lengkung lingkaran menunjukkan peningkatan pada ujung batang ke tengah batang, sedangkan pada model jembatan lengkung parabola, momen lentur cenderung meningkat secara signifikan dari ujung batang ke tengah batang. Gambar 34 menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

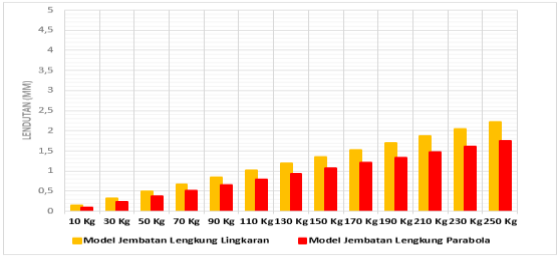
Perbandingan Tegangan Struktur Jembatan



Gambar 35. Grafik *Step Loading* Tegangan pada Struktur Jembatan

Perbandingan *step loading* tegangan struktur jembatan dapat dilihat pada Gambar 35. Tegangan terbesar terjadi pada model jembatan lengkung parabola dengan tegangan sebesar 641,69 MPa pada batang 4 yang disebabkan oleh beban kombinasi berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. pola *step loading* pada kedua model jembatan menunjukkan *trend* naik secara konsisten.

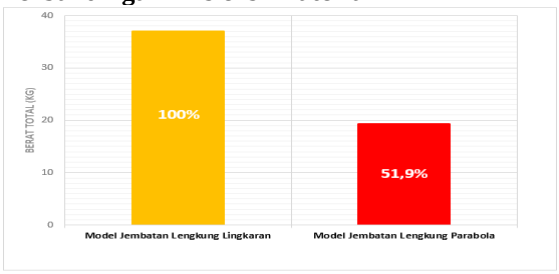
Perbandingan Lendutan Struktur Jembatan



Gambar 36. Grafik *Step Loading* Lendutan pada Struktur Jembatan

Perbandingan lendutan struktur jembatan dapat dilihat pada Gambar 36. Lendutan yang terbesar dan mendekati target pada Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 terjadi pada model jembatan lengkung lingkaran dengan lendutan sebesar 2,21 mm yang disebabkan oleh beban kombinasi berupa berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg. pola *step loading* pada kedua model jembatan menunjukkan *trend* naik secara konsisten.

Perbandingan Efisiensi Material

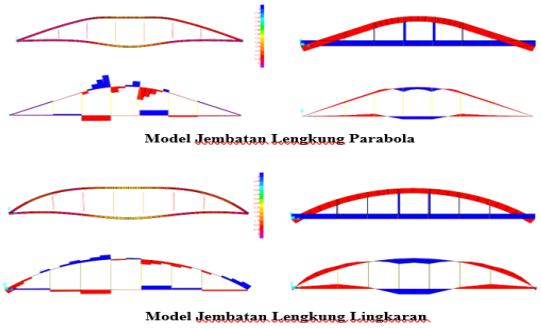


Gambar 37. Grafik Perbandingan Efisiensi Material pada Struktur Jembatan

Berdasarkan Gambar 37, dapat dikatakan bahwa semakin lebar kurva pelengkung maka semakin besar pula penggunaan material baja pada struktur jembatan. begitupun sebaliknya, semakin kecil lebar kurva maka semakin kecil pula penggunaan material baja pada struktur jembatan. Pada Gambar 37 menunjukkan bahwa model jembatan lengkung parabola memiliki berat yang lebih ringan sebesar 51,9% dari model jembatan lengkung lingkaran.

Dengan membandingkan kedua model jembatan tersebut, dapat disimpulkan bahwa bentuk lengkung yang efisien untuk kebutuhan material adalah bentuk lengkung parabola.

Interpretasi Hasil dengan Studi Pustaka



Gambar 38. Interpretasi Hasil Pengujian pada Model Jembatan Lengkung Parabola dan Model Jembatan Lengkung Lingkaran

Secara keseluruhan, hasil pengujian terinterpretasi selaras dengan prinsip teknis dan studi pustaka terkait. Beban vertikal merata pada lengkung parabola sebagian besar ditahan oleh gaya tekan aksial, mengakibatkan momen lentur yang minimal berbagai penelitian menyatakan bahwa bentuk

lengkung parabola optimal untuk beban mendatar seragam menghasilkan deformasi (lendutan) yang lebih rendah dan stabilitas struktural yang lebih tinggi dibanding lengkung lingkaran. Sebaliknya lengkung lingkaran tidak mencapai profil tekan funikular pada beban seragam, sehingga lebih banyak mengalami pembebanan lentur dan kelemahan kinerja *under* kondisi tersebut. Dengan demikian, interpretasi hasil menegaskan bahwa variasi bentuk lengkung secara signifikan mempengaruhi perilaku struktur jembatan pelengkung, bentuk lengkung parabola menawarkan distribusi gaya tekan yang lebih efisien dan stabilitas yang lebih baik dibawah beban vertikal seragam dibandingkan bentuk lengkung lingkaran.

5. KESIMPULAN

1. Secara umum, gaya-gaya dalam yang bekerja pada struktur utama pelengkung, yaitu pelengkung utama (*arch rib*), kabel penggantung (*hanger*), dan gelagar memanjang (*stringer*), cenderung menurun seiring dengan bertambahnya lebar kurva lengkungan. Pola grafik perbandingan respons struktur pada masing-masing model jembatan menunjukkan karakteristik yang berbeda.
2. Semakin lebar kurva jembatan, struktur menjadi lebih berat, yang berdampak pada peningkatan kebutuhan material baja. Hal ini disebabkan oleh faktor penentuan penampang profil, di mana pemilihan profil baja memiliki pengaruh signifikan terhadap berat keseluruhan struktur jembatan.
3. Agar jembatan pelengkung dalam studi kasus Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 dapat berfungsi secara optimal dan menghasilkan respons struktur yang lebih efisien, bentuk lengkung yang paling tepat digunakan adalah lengkung parabola.

6. SARAN

1. Penelitian ini membandingkan dua variasi bentuk lengkung pada jembatan pelengkung. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, disarankan agar penelitian selanjutnya menambahkan variasi bentuk lengkung lainnya guna memperluas perbandingan.
2. Respons struktur yang dianalisis dalam penelitian ini mencakup gaya-gaya dalam, tegangan, dan lendutan pada struktur utama jembatan. Untuk meningkatkan keakuratan studi berikutnya, disarankan agar respons struktur pada komponen lain, seperti ikatan angin (*bracing*), gelagar melintang (*cross girder*), dan komponen penyusun dek lainnya.
3. Beban yang diperhitungkan dalam analisis respons struktur utama jembatan meliputi berat sendiri dan pelat baja seberat 250 kg, sesuai dengan Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024. Penelitian selanjutnya akan lebih optimal jika mempertimbangkan pembebanan yang sesuai dengan kondisi jembatan sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. (2020). *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Sukirno, Fahimuddin, F., Purnomo, H., Budio, S. P., Amalia, & Prihutomo, N. B. (2024). *Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia XIX Tahun 2024*. Jakarta: Balai Pengembangan Talenta Indonesia, Pusat Prestasi Nasional, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

Paransa, F. A. J. (2020). *Studi Perbandingan Pengaruh Variasi Tinggi Lengkung terhadap Panjang Bentang 120 Meter pada Jembatan Rangka Tipe Menerus: Studi Kasus Jembatan Dian Pulau–Tetoat.* Universitas Islam Indonesia.

Zaini, M., Suprapto. (2018). *Analisis Optimalisasi Tinggi Fokus (f) Pelengkung pada*

Perencanaan Jembatan Lengkung Tipe Lantai Atas (Arch Bridge Deck Type). Vol. 2 No. 2/REKAT/18 (2018): Wisuda ke-92 Periode 2 Tahun 2018.

Almulianur, A., Aminullah, A., Muslikh, M. (2018). *Optimasi Geometri Berdaraskan Gaya-Gaya Dalam Pada Jembatan Pelengkung Beton*. INERSIA, Vol XIV No. 2.

Kumalasari, I (2017). *Efisiensi Profil Rangka Baja pada Jembatan Lantai Atas dan Lantai Bawah terhadap Variasi Tinggi Rangka*. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.

Maisyarah, F (2015). *Studi Perbandingan Tinggi Busur terhadap Bentang Utama pada Jembatan Busur Rangka Baja Tipe A Half-Through Arch Bridge. Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.

Struyk, H.J. et al. (1984). *Jembatan.* Pradnya Paramita. Jakarta.

Wen, L. Q. et al. (2010). *Stability Analysis of Special-Shape Arch Bridge*. *Tamkang Journal of Science and Engineering.* Taiwan.

Ramachandran, M., Zhang, Y., & Singh, A. (2018). *Comparative Study of Structural Behavior in Arch Bridges with Varying Geometric Configurations. Journal of Bridge Engineering*, 23(4), 04018014.

Austin, W.J., & Ross, T.J. (1976). *Elastic Buckling of Arches under Symmetrical Loading*, *Journal of Stuctural Division* ASCE, Vol. 120, 1085-1095