

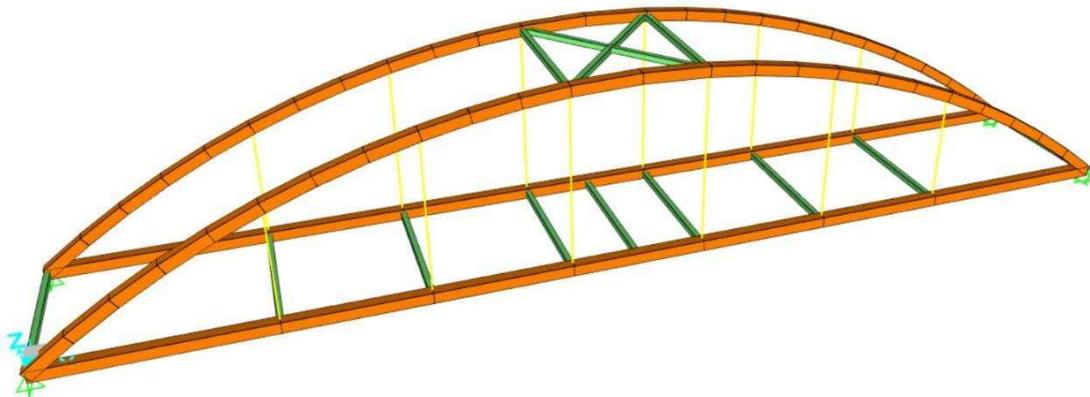
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

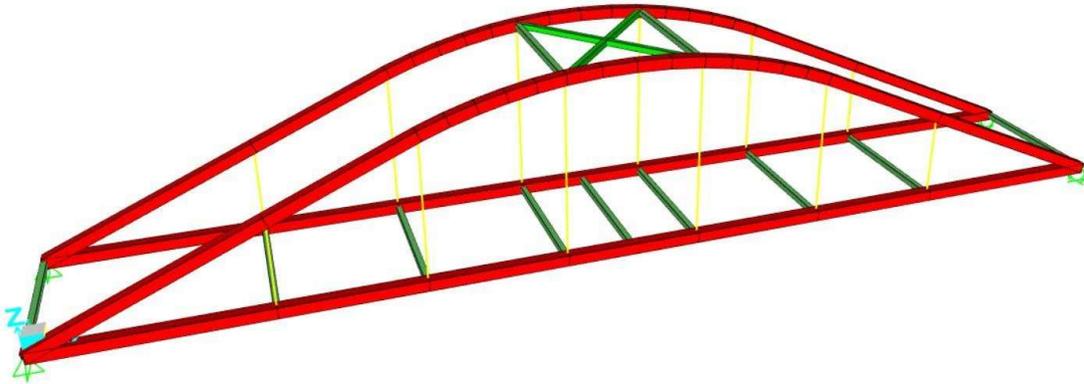
4.1 Perencanaan Struktur

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*). Pemodelan jembatan berdasarkan variasi bentuk lengkungnya dapat dilihat pada **Gambar 4. 1** dan **Gambar 4. 2**.



Gambar 4. 1 Pemodelan Jembatan dengan Bentuk Lengkung Lingkaran pada *software* SAP2000

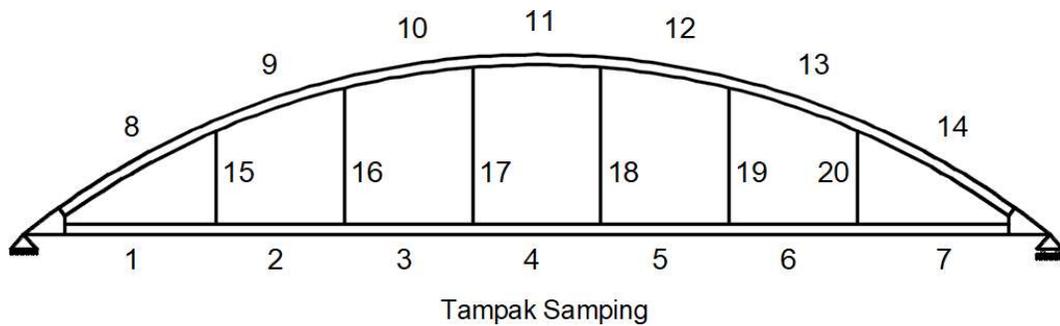


Gambar 4. 2 Pemodelan Jembatan dengan Bentuk Lengkung Parabola pada *software* SAP2000

4.2 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. Berikut adalah penomoran batang pada struktur jembatan dapat dilihat pada **Gambar 4. 3**.



Gambar 4. 3 Penomoran Batang Komponen Struktur Jembatan

4.2.1 Pembebanan Struktur Jembatan

Dalam penelitian ini, pembebanan jembatan mengikuti Pedoman Kompetensi 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.

1. Beban Mati (*DL - Dead Load*)

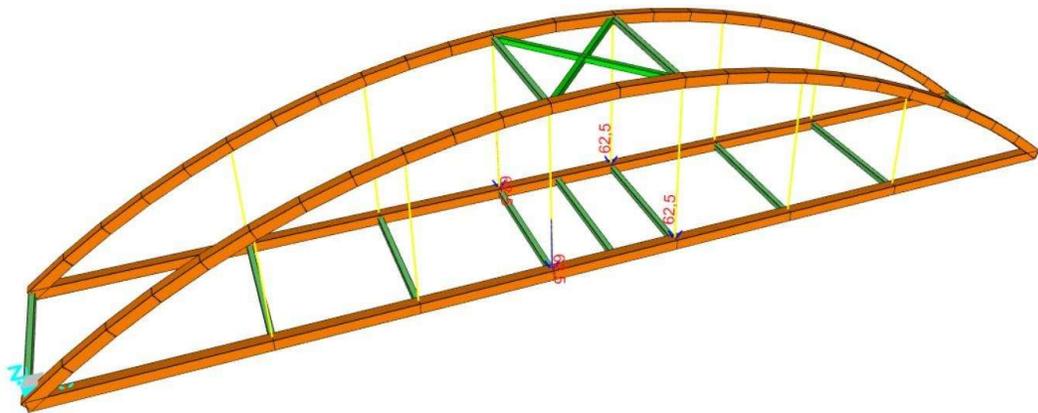
Perhitungan berat sendiri jembatan pada penelitian ini otomatis dihitung pada *software* SAP2000 v.24. berikut hasil analisa berat sendiri jembatan dapat dilihat pada **Tabel 4. 1.**

Tabel 4. 1 Perhitungan Berat Sendiri pada *software* SAP2000

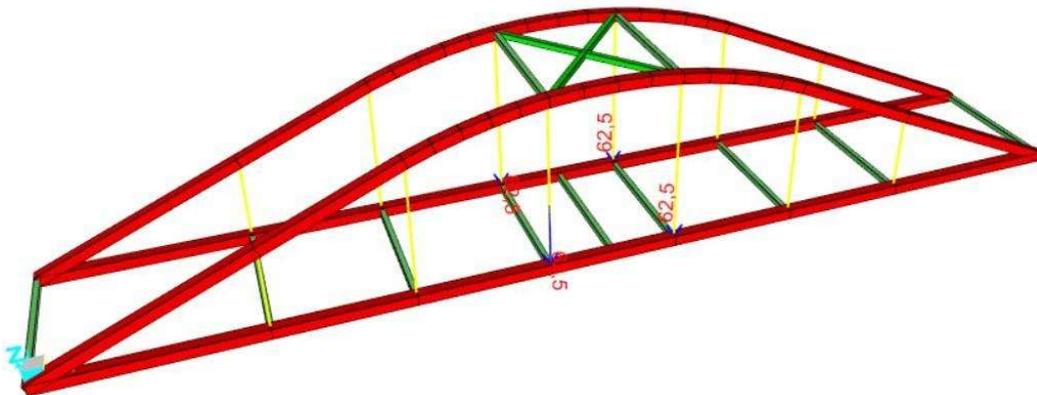
Komponen	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	Berat (Kgf)	Berat (kN)	Berat (Kgf)	Berat (kN)
Pelengkung Utama (<i>Arch Rib</i>)	16,66	0,163	7,38	0,072
Gelagar Memanjang (<i>Stringer</i>)	15,43	0,151	6,91	0,068
Gelagar Melintang (<i>Cross Girder</i>)	3,94	0,039	3,94	0,039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

2. Beban Hidup (*LL - Live Load*)

Beban hidup jembatan pada penelitian ini mengacu pada Pedoman Kompetensi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 yaitu berupa beban pelat baja 250 kg yang terpusat pada tengah bentang jembatan. Distribusi beban dapat dilihat pada **Gambar 4. 4** dan **Gambar 4. 5**.



Gambar 4. 4 Distribusi Beban Hidup (*LL*) pada Jembatan Lengkung Lingkaran



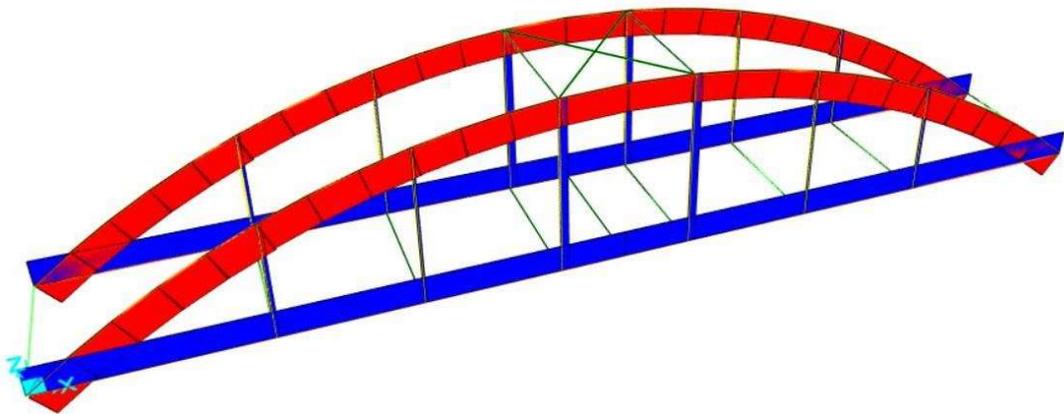
Gambar 4. 5 Distribusi Beban Hidup (*LL*) pada Jembatan Lengkung Parabola

4.2.2 Kombinasi Pembebanan

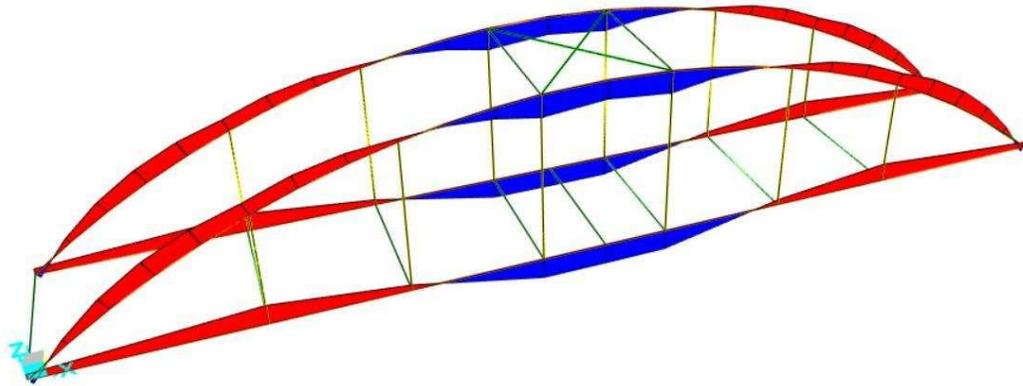
Setelah pemodelan struktur dan penerapan pembebanan selesai, selanjutnya struktur jembatan akan di analisis menggunakan kombinasi beban pada **Tabel 2.3** yaitu kombinasi pembebanan dan nilai faktor beban ($1,10DL + 1,00LL$).

4.2.3 Hasil Analisis Jembatan dengan Bentuk Lengkung Lingkaran

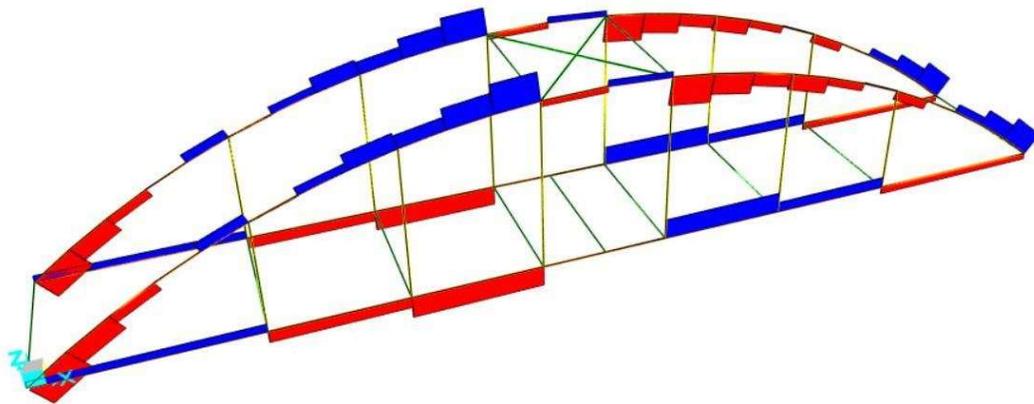
Berikut ini adalah visualisasi diagram yang terjadi pada model jembatan dengan bentuk lengkung lingkaran yang meliputi gaya aksial atau *normal force diagram*, gaya geser atau *shear force diagram*, momen lentur atau *bending moment diagram*, tegangan atau *stress diagram*, dan lendutan atau *deflection*.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



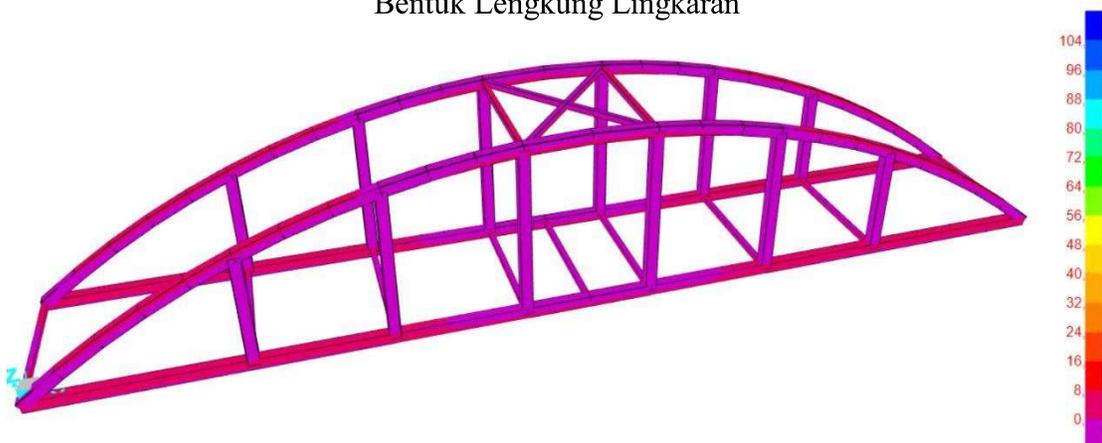
Gambar 4. 6 *Normal Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



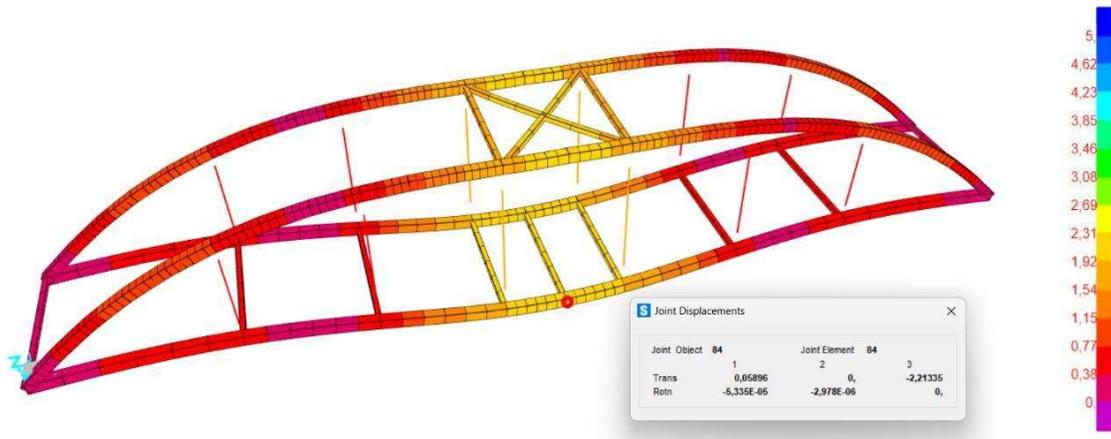
Gambar 4. 7 *Bending Moment Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



Gambar 4. 8 *Shear Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



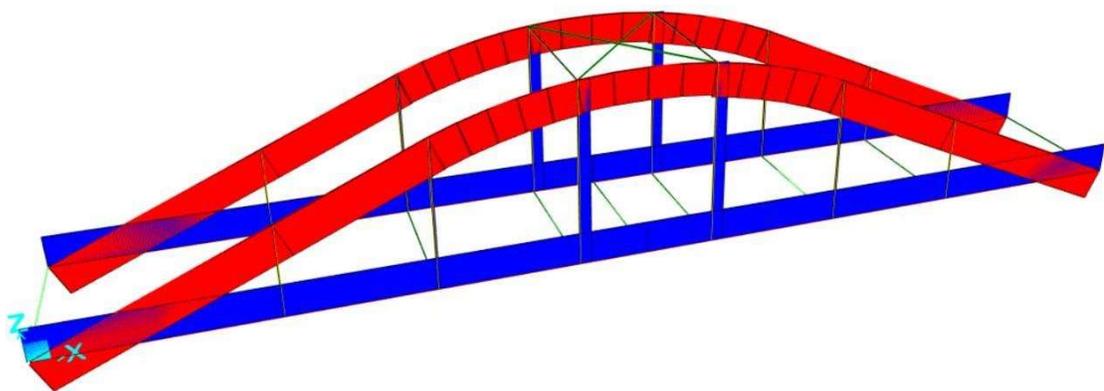
Gambar 4. 9 *Stress Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran



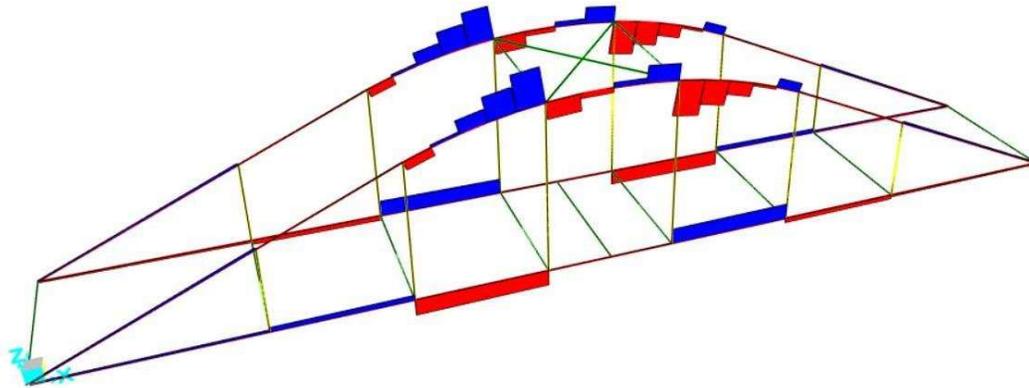
Gambar 4. 10 Deflection tengah bentang akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Lingkaran

4.2.4 Hasil Analisis Jembatan dengan Bentuk Lengkung Parabola

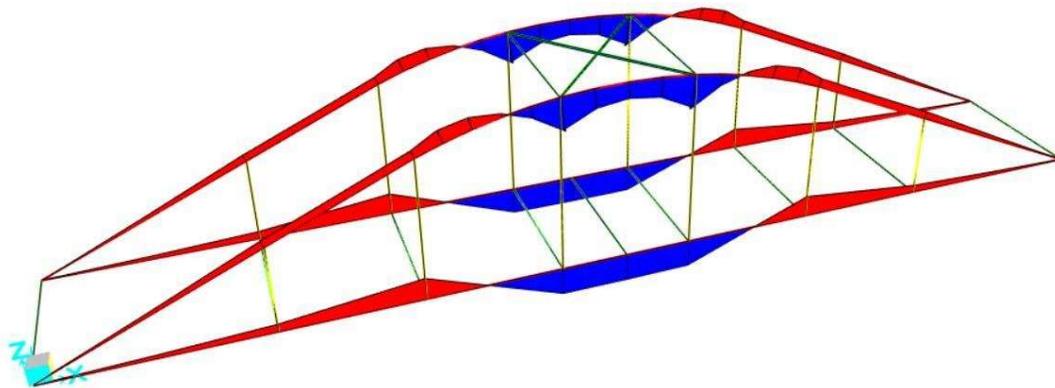
Berikut ini adalah visualisasi diagram yang terjadi pada model jembatan dengan bentuk lengkung parabola yang meliputi gaya aksial atau *normal force diagram*, gaya geser atau *shear force diagram*, momen lentur atau *bending moment diagram*, tegangan atau *stress diagram*, dan lendutan atau *deflection*.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



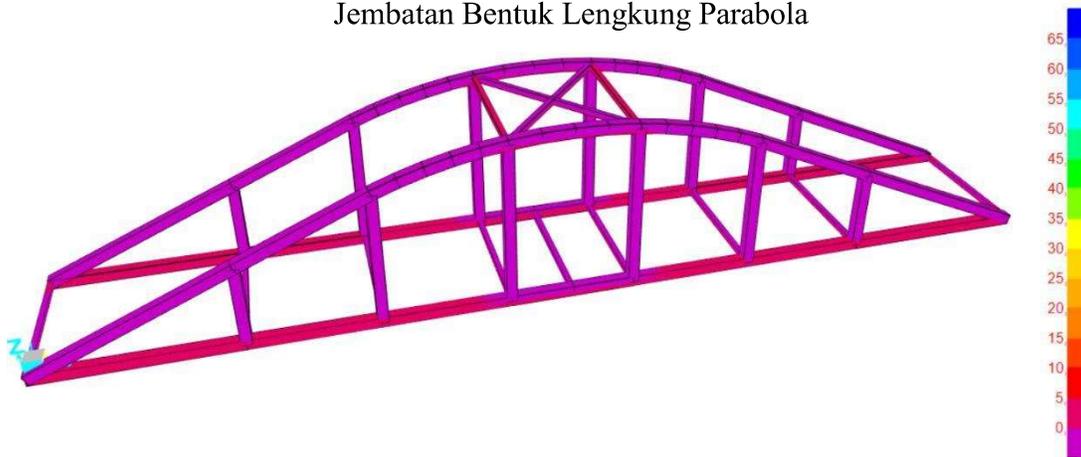
Gambar 4. 11 Normal Force Diagram akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



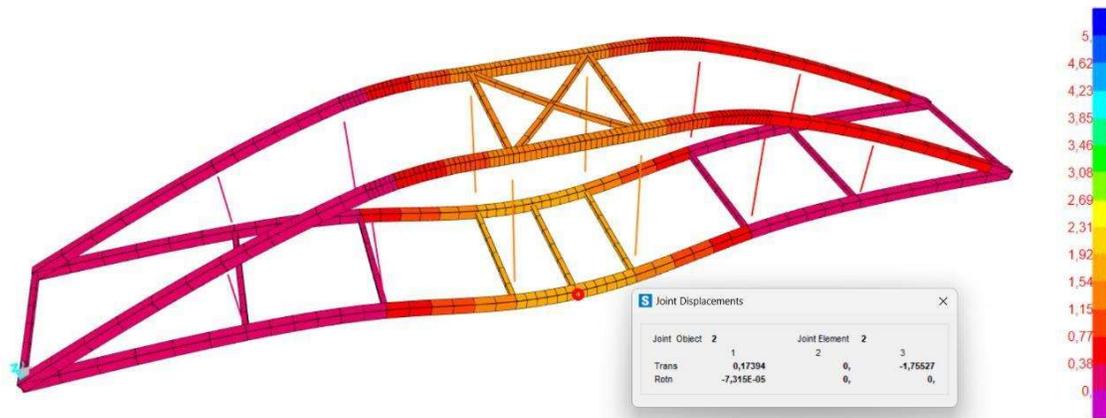
Gambar 4. 12 *Shear Force Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



Gambar 4. 13 *Bending Moment Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



Gambar 4. 14 *Stress Diagram* akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola



Gambar 4. 15 *Deflection* tengah bentang akibat Kombinasi Beban pada Model Jembatan Bentuk Lengkung Parabola

4.2.5 Rekapitulasi Hasil Analisis Jembatan

Respons struktur yang diperoleh dari kedua model jembatan melalui *software* SAP2000 v.24 akan dirangkum dalam tabel-tabel berikut. Respons struktur yang dianalisis dalam penelitian ini mencakup gaya-gaya dalam, tegangan pada nilai maksimum, dan lendutan tengah bentang yang dihasilkan dari kombinasi pembebanan pada struktur pelengkung jembatan. Komponen utama struktur pelengkung yang ditinjau gaya-gaya dalam dan tegangannya adalah pelengkung utama (*arch rib*) dan gelagar memanjang (*stringer*).

Tabel 4. 2 *Normal Force Diagram* pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
	Pu (kN)	Pu (kN)
8	-1,635	-1,671
9	-1,557	-1,674
10	-1,505	-1,615
11	-1,449	-1,454

12	-1,505	-1,615
13	-1,557	-1,674
14	-1,635	-1,671

Tabel 4. 3 *Shear Force Diagram* pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	V2 (kN)	V3 (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)
8	-0,261	0,0000871	0,016	0,000043
9	0,168	0,0000872	0,0071	0,000044
10	0,262	0,0000872	0,281	0,000044
11	-0,057	0,00000097	-0,129	0,0000000023
12	-0,262	-0,0000875	-0,281	-0,000044
13	-0,168	-0,0000875	0,0071	-0,000044
14	0,261	-0,0000874	0,016	-0,000043

Tabel 4. 4 *Bending Moment Diagram* pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	M2 (kN)	M3 (kN)	M2 (kN)	M3 (kN)
8	-0,25	-66,81	0,11	-9,82
9	-0,12	-52,12	0,078	-12,45
10	-0,046	86,51	-0,045	45,36
11	0,035	83,92	-0,063	42,71
12	-0,046	86,51	-0,045	45,36
13	-0,12	-52,12	-0,078	-12,45

14	-0,25	-66,81	-0,11	-9,82
----	-------	--------	-------	-------

Tabel 4. 5 *Stress Diagram* pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran			Model Jembatan Lengkung Parabola		
	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
8	15,49	0,07 < 1	Aman	-14,65	-0,06 < 1	Aman
9	10,93	0,05 < 1	Aman	-8,22	-0,03 < 1	Aman
10	22,56	0,10 < 1	Aman	17,57	0,08 < 1	Aman
11	21,85	0,10 < 1	Aman	17,02	0,08 < 1	Aman
12	22,56	0,10 < 1	Aman	17,57	0,08 < 1	Aman
13	10,93	0,05 < 1	Aman	-8,22	-0,03 < 1	Aman
14	15,49	0,07 < 1	Aman	-14,65	-0,06 < 1	Aman

Tabel 4. 6 *Normal Force Diagram* pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
	Pu (kN)	Pu (kN)
15	0,179	-0,015
16	0,138	0,157
17	0,403	0,504
18	0,403	0,504
19	0,138	0,157
20	0,179	-0,015

Tabel 4. 7 Stress Diagram pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran			Model Jembatan Lengkung Parabola		
	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
15	227,57	0,14 < 1	Aman	-19,22	-0,01 < 1	Aman
16	176,19	0,11 < 1	Aman	200,33	0,12 < 1	Aman
17	512,51	0,32 < 1	Aman	641,69	0,40 < 1	Aman
18	512,51	0,32 < 1	Aman	641,69	0,40 < 1	Aman
19	176,19	0,11 < 1	Aman	200,33	0,12 < 1	Aman
20	227,57	0,14 < 1	Aman	-19,22	-0,01 < 1	Aman

Tabel 4. 8 Strain pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$
15	0,0011	-0,000096
16	0,00088	0,001
17	0,0025	0,0032
18	0,0025	0,0032
19	0,00088	0,001
20	0,0011	-0,000096

Tabel 4. 9 *Normal Force Diagram* pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
	Pu (kN)	Pu (kN)
1	1,449	1,531
2	1,449	1,531
3	1,449	1,531
4	1,449	1,531
5	1,449	1,531
6	1,449	1,531
7	1,449	1,531

Tabel 4. 10 *Shear Force Diagram* pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	V2 (kN)	V3 (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)
1	0,074	-0,000185	0,015	-0,000071
2	-0,103	0,0000773	0,037	0,000029
3	-0,229	-0,000018	-0,119	-0,0000074
4	-0,0062	0,0000086	0,0032	0,0000043
5	0,229	0,000018	0,119	0,0000074
6	0,103	-0,0000773	-0,037	-0,000029
7	-0,074	0,000185	-0,015	0,000071

Tabel 4. 11 *Bending Moment Diagram* pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran		Model Jembatan Lengkung Parabola	
	M2 (kN)	M3 (kN)	M2 (kN)	M3 (kN)
1	-0,11	-74,3	-0,04	-9,15
2	0,031	-74,3	0,011	-26,24
3	-0,0071	86,5	-0,0028	32,02
4	0,0018	87,41	0,00083	32,55
5	-0,0071	86,5	-0,0028	32,02
6	0,031	-74,3	0,011	-26,24
7	-0,11	-74,3	-0,04	-9,15

Tabel 4. 12 *Stress Diagram* pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran			Model Jembatan Lengkung Parabola		
	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
1	30,46	0,14 < 1	Aman	20,37	0,09 < 1	Aman
2	30,46	0,14 < 1	Aman	32,43	0,15 < 1	Aman
3	34,48	0,16 < 1	Aman	36,51	0,17 < 1	Aman
4	34,78	0,16 < 1	Aman	36,88	0,17 < 1	Aman
5	34,48	0,16 < 1	Aman	36,51	0,17 < 1	Aman
6	30,46	0,14 < 1	Aman	32,43	0,15 < 1	Aman
7	30,46	0,14 < 1	Aman	20,37	0,09 < 1	Aman

Tabel 4. 13 Step Loading Stress Struktur Jembatan

Model Jembatan Lengkung Lingkaran			Model Jembatan Lengkung Parabola		
Step Loading	Beban (Kg)	σ Maksimal (MPa)	Step Loading	Beban (Kg)	σ Maksimal (MPa)
1	10	33,07	1	10	38,09
2	30	72,95	2	30	88,39
3	50	112,83	3	50	138,68
4	70	152,78	4	70	188,98
5	90	192,60	5	90	239,27
6	110	232,48	6	110	289,57
7	130	272,36	7	130	339,86
8	150	312,24	8	150	390,16
9	170	352,18	9	170	440,45
10	190	392,01	10	190	490,75
11	210	431,89	11	210	541,04
12	230	471,77	12	230	591,34
13	250	512,51	13	250	641,69

Tabel 4. 14 Deflection Tengah Bentang Struktur Jembatan

Model Jembatan Lengkung Lingkaran				Model Jembatan Lengkung Parabola			
Δ Aktual (mm)	Δ Aktual < Δ Ijin (mm)	Rasio Δ Target	Kontrol	Δ Aktual (mm)	Δ Aktual < Δ Ijin	Rasio Δ Target	Kontrol
2,21	2,21 < 5	0,88 : 1	Aman	1,75	1,75 < 5	0,7 : 1	Aman

Tabel 4. 15 *Step Loading Deflection* Tengah Bentang Struktur Jembatan

Model Jembatan Lengkung Lingkaran			Model Jembatan Lengkung Parabola		
<i>Step Loading</i>	Beban (Kg)	Δ Aktual (mm)	<i>Step Loading</i>	Beban (Kg)	Δ Aktual (mm)
1	10	0,15	1	10	0,09
2	30	0,32	2	30	0,23
3	50	0,49	3	50	0,37
4	70	0,67	4	70	0,50
5	90	0,84	5	90	0,64
6	110	1,01	6	110	0,78
7	130	1,18	7	130	0,92
8	150	1,35	8	150	1,06
9	170	1,52	9	170	1,20
10	190	1,69	10	190	1,33
11	210	1,87	11	210	1,47
12	230	2,04	12	230	1,61
13	250	2,21	13	250	1,75

4.3 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 pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. 16 Desain Penampang Profil Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
8	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
9	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
10	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
11	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
12	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
13	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
14	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>

Tabel 4. 17 Desain Penampang Profil Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
1	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
2	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
3	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
4	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
5	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
6	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>
7	<i>Hollow 40×40×1,6</i>	<i>Hollow 40×40×0,7</i>

Tabel 4. 18 Desain Penampang Profil Gelagar Melintang (*Cross Girder*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
21	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
22	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
24	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
25	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
26	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
27	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
28	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
29	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
30	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
31	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
32	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>

Tabel 4. 19 Desain Penampang Profil Ikatan Angin (*Bracing*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
23	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>
24	<i>Hollow 20×20×1</i>	<i>Hollow 20×20×1</i>

Tabel 4. 20 Desain Penampang Profil Penggantung (*Hanger*)

Batang	Model Jembatan Lengkung Lingkaran	Model Jembatan Lengkung Parabola
15	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>
16	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>
17	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>
18	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>
19	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>
20	<i>Wire Rope 1 mm</i>	<i>Wire Rope 1 mm</i>

4.4 Kebutuhan Material Baja Struktur Jembatan

Kebutuhan material baja dapat dikalkulasi setelah perencanaan penampang struktur selesai. Banyaknya material baja yang diperlukan untuk masing-masing model jembatan dalam penelitian ini dapat diketahui dari berat sendiri struktur jembatan. Data tersebut diperoleh melalui fitur *selfweight* pada *software* SAP2000 v.24. Model jembatan lengkung lingkaran memiliki berat sebesar 37 Kgf atau 0,362 kN dan model jembatan lengkung parabola memiliki berat sebesar 19,19 Kgf atau 0,188 kN . Rekapitulasi Kebutuhan material dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

4.5 Kontrol Kekuatan Kapasitas Sambungan

Jembatan pada penelitian ini menggunakan sambungan tipe pelat (*gusset*) untuk menyambungkan komponen struktur yang didukung oleh baut sebagai elemen pengencang. Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal J, sambungan baut pada komponen struktur harus ditentukan berdasarkan ketentuan berikut.

a. Jarak Tepi

Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal J3.4, jarak tepi minimum tidak boleh kurang dari diameter baut (*db*). Maka dari itu dicoba jarak tepi minimum baut sebesar 14 mm sebagai berikut.

$$1,5db < x < 12tp$$

$$9 \text{ mm} < 14 \text{ mm} < 14,4 \text{ mm (AMAN)}$$

Adapun jarak tepi maksimum baut ditentukan dengan persyaratan berikut.

$$x < 12tp < 150 \text{ mm}$$

$$14 \text{ mm} < 14,4 \text{ mm} < 150 \text{ mm (AMAN)}$$

Didapatkan jarak tepi baut sebesar **14 mm**.

b. Jarak Antar Baut (Spasi)

Jarak antara as lubang ke lubang harus sesuai dengan SNI 1729:2020 pasal J3.3 dan J3.5. Spasi minimum baut ditentukan sebagai berikut.

$$3db$$

$$3 \times 6 \text{ mm}$$

$$18 \text{ mm}$$

Spasi maksimum antar baut tidak boleh melebihi 24 kali tebal pelat, maka dari itu ditentukan spasi maksimum antar baut sebagai berikut.

$$24tp$$

$$24 \times 1,2 \text{ mm}$$

$$28,8 \text{ mm}$$

Digunakan jarak antar baut sebesar **18 mm**

c. Menghitung Kekuatan Desain Baut

Kekuatan desain baut dihitung berdasarkan kombinasi gaya tarik dan geser serta kekuatan tumpu dan sobek pada lubang baut. Kekuatan desain baut ditentukan sebagai berikut.

1. Kuat Geser

Kekuatan baut terhadap gaya geser harus diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut.

$$\phi R_n = \phi \times F_{nv} \times A_b \times m$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 640 \times 28,26 \times 1$$

$$\phi R_n = 13564,8 \text{ N} = 13,564 \text{ kN}$$

2. Kuat Tarik

Kekuatan tarik baut diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \times F_{nt} \times A_b \\ \phi R_n &= 0,75 \times 800 \times 28,26 \\ \phi R_n &= 16956 \text{ N} = 16,956 \text{ kN}\end{aligned}$$

3. Kuat Tumpu

Kekuatan pada lubang baut harus ditentukan untuk keadaan tumpu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \times 2,4 \times db \times tp \times F_u \\ \phi R_n &= 0,75 \times 2,4 \times 6 \times 1,2 \times 340 \\ \phi R_n &= 4406,4 \text{ N} = 4,406 \text{ kN}\end{aligned}$$

4. Kuat Sobek

Kekuatan pada lubang baut harus ditentukan untuk keadaan sobek sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \times 1,2 \times Ic \times tp \times F_u \\ \phi R_n &= 0,75 \times 1,2 \times 10,75 \times 1,2 \times 340 \\ \phi R_n &= 3947,4 \text{ N} = 3,947 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.5.1 Kontrol Desain Sambungan Model Jembatan Lengkung Lingkaran pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perhitungan kontrol desain sambungan dibawah ini mengacu pada hasil desain penampang profil pada lengkung lingkaran di pelengkung utama (*arch rib*).

Berdasarkan analisa SAP2000 didapatkan nilai P_u : -1,635 kN

Menentukan Jumlah Baut :

$$\begin{aligned}N &= \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{1,635}{3,947} \\ &= 0,41 \approx 1 \text{ Buah (memenuhi kapasitas minimum jumlah baut)}\end{aligned}$$

4.5.2 Kontrol Desain Sambungan Model Jembatan Lengkung Parabola pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perhitungan kontrol desain sambungan dibawah ini mengacu pada hasil desain penampang profil pada lengkung parabola di pelengkung utama (*arch rib*).

Berdasarkan analisa SAP2000 didapatkan nilai P_u : -1,674 kN

Menentukan Jumlah Baut :

$$N = \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{1,674}{3,947}$$
$$= 0,42 \approx 1 \text{ Buah (memenuhi kapasitas minimum jumlah baut)}$$

4.5.3 Kontrol Desain Sambungan Model Jembatan Lengkung Lingkaran pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perhitungan kontrol desain sambungan dibawah ini mengacu pada hasil desain penampang profil pada lengkung lingkaran di gelagar memanjang (*stringer*).

Berdasarkan analisa SAP2000 didapatkan nilai P_u : 1,449 kN

Menentukan Jumlah Baut :

$$N = \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{1,449}{3,947}$$
$$= 0,37 \approx 1 \text{ Buah (memenuhi kapasitas minimum jumlah baut)}$$

4.5.4 Kontrol Desain Sambungan Model Jembatan Lengkung Parabola pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perhitungan kontrol desain sambungan dibawah ini mengacu pada hasil desain penampang profil pada lengkung parabola di gelagar memanjang (*stringer*).

Berdasarkan analisa SAP2000 didapatkan nilai P_u : 1,531 kN

Menentukan Jumlah Baut :

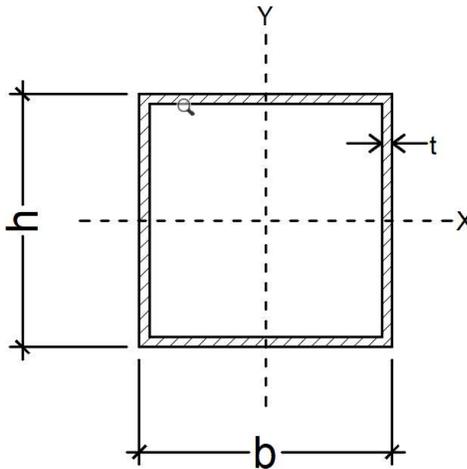
$$N = \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{1,531}{3,947}$$

$$= 0,39 \approx 1 \text{ Buah (memenuhi kapasitas minimum jumlah baut)}$$

4.6 Kontrol Desain Penampang Jembatan

Perhitungan kontrol desain penampang profil dibawah ini mengacu pada hasil desain penampang profil pada lengkung lingkaran dan lengkung parabola di pelengkung utama (*arch rib*), kabel penggantung (*hanger*), dan gelagar memanjang (*stringer*).

4.6.1 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Lingkaran pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 4. 16 Penampang Profil *Hollow* 40×40×1,6

Pengecekan keamanan penampang profil dilakukan pada batang 8. Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil *Hollow* 40×40×1,6 yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 21 Properti Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	210	MPa
Tegangan Putus	F_u	340	MPa
Angka Poisson		0,3	

Tabel 4. 22 Geometri Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Tebal Dinding Desain	t	1,6	mm
Lebar Sayap	b	40	mm
Tinggi Badan	h	40	mm
Luas Penampang	A_g	245,76	mm ²
Radius Girasi sb, Y	r_y	15,69	mm
Modulus Plastis Penampang	Z	3540,99	mm ³
Modulus Elastis Penampang	S	3025,14	mm ³
Konstanta Torsi	J	90596,97	mm ⁴

Tabel 4. 23 Hasil Analisis Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	1,635	kN
Momen Maksimum	M_u	86,51	kNmm
Gaya Geser Maksimum	V_u	0,262	kNmm
Panjang Bentang Profil	L_b	0,87539	m
		875,39	mm
Momen pada 1/4 L	M_A	43,44	kNmm
Momen pada 1/2 L	M_B	58,71	kNmm
Momen pada 3/4 L	M_C	66,53	kNmm

a. Klasifikasi Penampang Profil

1) Klasifikasi Kelangsingan Penampang Profil

Kelangsingan merupakan perbandingan antara ketebalan sayap atau badan dengan lebarnya. Dalam kondisi tekan, penampang diklasifikasikan sebagai elemen tidak langsing atau elemen langsing. Jika suatu elemen memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang melebihi batas rasio (λ_r) yang ditetapkan dalam **Tabel 2.4**, maka elemen tersebut dikategorikan sebagai langsing. Sebaliknya, jika rasio tersebut berada di bawah batas yang ditentukan, maka penampang disebut tidak langsing.

- Batasan rasio

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

- Rasio tebal-lebar

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{tidak \textit{ langsing}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{tidak \textit{ langsing}} \end{aligned}$$

Klasifikasi kelangsingan pada penampang *Hollow* 40×40×1,6 adalah penampang tidak langsing.

2) Klasifikasi Kekompakan Penampang Profil

Komponen struktur yang menahan lentur memiliki dua kategori berdasarkan kekompakan penampangnya, yaitu kompak dan tidak kompak. Penampang dikatakan kompak jika sayapnya terhubung dengan badan serta memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak (λ_p) sesuai **Tabel 2.5**. Sementara itu, jika rasio (λ) melampaui (λ_p) tetapi masih berada dalam batas kelangsingan elemen tidak kompak (λ_r) berdasarkan **Tabel 2.5**, maka penampang tersebut dikategorikan sebagai tidak kompak.

- Batasan elemen kompak (λ_p)

$$\text{Sayap} = 1,12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,12\sqrt{\frac{200000}{210}} = 34,564$$

$$\text{Badan} = 2,42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,42\sqrt{\frac{200000}{210}} = 74,683$$

- Batasan elemen tidak kompak (λ_r)

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 5,7\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5,7\sqrt{\frac{200000}{210}} = 175,906$$

- Rasio tebal-lebar (λ)

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 34,564 \text{ maka, } \mathbf{kompak} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 74,683 \text{ maka, } \mathbf{kompak} \end{aligned}$$

Nilai rasio lebar-terhadap-lebar bagian sayap maupun badan tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak. Sehingga penampang *Hollow* 40×40×1,6 adalah penampang kompak.

b. Perhitungan Komponen Struktur Tekan

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×1,6 dikategorikan sebagai penampang tidak langsing. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.6**, tepatnya pada Bab E3. Kekuatan tekan desain ($\phi c P_n$) dihitung berdasarkan kekuatan tekan nominal (P_n), yang diambil sebagai nilai terendah dari batas kegagalan akibat tekuk lentur dan tekuk torsi. Faktor ketahanan terhadap tekan (ϕc) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Panjang Efektif

Menurut SNI 1729:2020, faktor panjang efektif (K) yang digunakan dalam perhitungan kelangsingan komponen struktur ditetapkan sebesar 1,0. Untuk elemen struktur yang dirancang menahan tekan, rasio kelangsingan efektif (KL/r) disarankan tidak melebihi 200.

- Panjang efektif (K) = 1
- Panjang batang (L) = 875,39 mm
- Radius girasi (r) = 15,69 mm

$$\begin{aligned}\text{Rasio kelangsingan efektif} &= \frac{KL}{r} \\ &= \frac{875,39}{15,69} \\ &= 55,793 < 200 \text{ OK}\end{aligned}$$

3) Tekuk-Lentur

Tekuk lentur dipengaruhi oleh kelangsingan efektif suatu elemen, dengan kekuatan tekan ditentukan berdasarkan tegangan kritis (F_{cr}) dari penampang. Nilai tegangan kritis ini diperoleh dari teori tekuk euler. Tekuk terjadi pada sumbu dengan kelangsingan terbesar, yaitu sumbu dengan momen inersia atau jari-jari girasi terkecil. Adapun perhitungan tekuk lentur dilakukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Rasio kelangsingan efektif} &= \frac{KL}{r} \\ &= \frac{875,39}{15,69} \\ &= 55,793 \\ 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} &= 4,71 \sqrt{\frac{200000}{210}} \\ &= 113,45\end{aligned}$$

Ternyata $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, maka menurut SNI 1729:2020 terjadi tekuk lentur inelastis.

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Tekuk Euler } (F_e) &= \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \\ &= \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{1 \times 875,39}{15,69}\right)^2} \\ &= 633,479 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Kritis Tekuk Lentur Inelastis } (F_{cr}) &= [0,658^{\frac{F_y}{F_e}}] \times F_y \\ &= [0,658^{\frac{210}{633,479}}] \times 210 \\ &= 45,807 \text{ MPa} \end{aligned}$$

4) Kuat Tekan Nominal

Bersumber pada ketentuan umum di atas, kekuatan tekan nominal (P_n) harus diambil dari nilai terendah pada tegangan kritis keadaan tekuk lentur atau tekuk torsi.

$$F_{cr} \text{ tekuk lentur} = 45,807 \text{ MPa}$$

Nilai tegangan kritis yang dipakai untuk menghitung kekuatan tekan nominal yaitu 45,807 MPa.

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan nominal } (P_n) &= F_{cr} \times A_g \\ &= 45,807 \times 245,76 \\ &= 11257,544 \text{ N} \\ &= 11,258 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan nominal } (\Phi P_n) &= 0,90 \times 11,258 \\ &= 10,132 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tekan *ultimate*.

$$P_u < \Phi P_n$$

1,635 kN < 10,132 kN, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tekan maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{P_u}{\Phi P_n} = 0,16$.

c. Perhitungan Komponen Struktur Lentur

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×1,6 termasuk dalam komponen struktur dengan simetris ganda dan memiliki penampang kompak pada kedua bagiannya. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.7**, tepatnya pada Bab F7. Kekuatan lentur desain ($\Phi_b M_n$) dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal (M_n), yang diambil sebagai nilai terendah sesuai dengan batas kegagalan akibat leleh (momen plastis) dan tekuk torsi-lateral. Faktor ketahanan terhadap lentur (Φ_b) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Kondisi Leleh

Ketika semua daerah dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan kondisi plastis. Tahanan momen nominal dalam kondisi ini dinamakan momen plastis (M_p), yang besarnya didefinisikan sebagai tegangan leleh dikali modulus penampang plastis, Adapun momen yang dipertimbangkan yakni momen arah sumbu lemah.

Kuat lentur plastis (M_p) ialah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh, harus diambil yang lebih kecil dari $f_y \times Z$ atau $1,5 M_y$. Berikut adalah perhitungan menentukan batas momen plastis.

$$\begin{aligned}
 \text{Momen leleh } (M_y) &= f_y \times Z \\
 &= 210 \times 3540,99 \\
 &= 743607,9 \text{ Nmm} \\
 &= 743,608 \text{ kNmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 1,5 M_y &= 1,5 (f_y \times Z) \\
 &= 1,5 \times 743607,9 \\
 &= 1115411,9 \text{ Nmm} \\
 &= 1115,412 \text{ kNmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Momen plastis } (M_p) &= f_y \times Z \\
 &= 210 \times 3540,99 \\
 &= 743607,9 \text{ Nmm} \\
 &= 743,608 \text{ kNmm}
 \end{aligned}$$

Ternyata $M_p < 1,5 M_y$, sehingga kuat lentur plastis $M_p = 743,608 \text{ kNmm}$. Oleh karena itu, momen nominal kondisi leleh ialah sebesar $M_n = M_p = 743,608 \text{ kNmm}$.

3) Tekuk Lokal Sayap

Tekuk lokal sayap terjadi ketika sayap balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena sayap yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow 40×40×1,6*, elemen yang terjadi adalah kompak dan tidak langsing maka keadaan batas tekuk lokal sayap tidak berlaku.

4) Tekuk Lokal Badan

Tekuk lokal badan terjadi ketika badan balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena badan yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow* 40×40×1,6, elemen yang terjadi adalah kompak dan tidak langsing maka keadaan batas tekuk lokal badan tidak berlaku.

5) Tekuk Torsi-Lateral

Tekuk torsi lateral terjadi ketika elemen struktur mengalami perpindahan lateral dan puntiran akibat beban yang diberikan. Keberadaan tekuk lateral bergantung pada panjang bentang elemen struktur. Klasifikasi panjang bentang penampang meliputi beberapa kategori berikut:

- Bentang pendek ($L_b \leq L_p$)
- Bentang menengah ($L_b < L_b \leq L_p$)
- Bentang panjang ($L_b > L_r$)

Di mana L_b adalah panjang bentang profil, sedangkan L_p dan L_r masing-masing merupakan batas panjang bentang pendek dan menengah. Sesuai dengan SNI 1729:2020, berikut adalah klasifikasi panjang bentang untuk profil *Hollow* 40×40×1,6.

$$L_b = 875,39 \text{ mm}$$

$$L_p = 0,13 Er \frac{I_{Ag}}{y \sqrt{M_p}}$$

$$= 0,13 \times 200000 \times 15,69 \sqrt{\frac{90596,97 \times 245,76}{635279,4}}$$

$$= 2415051,2 \text{ mm}$$

$$L_b \leq L_p$$

$$875,39 \text{ mm} \leq 2415051,2 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, ternyata penampang profil *Hollow* 40×40×1,6 tergolong bentang pendek jadi keadaan batas tekuk torsi-lateral tidak berlaku.

6) Kuat Lentur Nominal

Setelah melakukan perhitungan komponen struktur lentur di atas, selanjutnya adalah memilih momen nominal yang paling menentukan dari masing-masing kondisi batas.

$$M_n \text{ berdasarkan kondisi leleh} = 743,608 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ yang dipakai} = 743,608 \text{ kNmm}$$

Sehingga,

$$\text{Kuat lentur nominal } (M_n) = 743,608 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat lentur desain } (\Phi M_n) &= 0,9 \times 743,608 \\ &= 669,247 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya lentur *ultimate*.

$$M_u < \Phi M_n$$

$$86,51 \text{ kNmm} < 669,247 \text{ kNmm}, \text{ maka AMAN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya lentur maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan lentur nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{M_u}{\Phi M_n} = 0,15$.

d. Perhitungan Komponen Struktur Geser

Komponen struktur geser harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab G SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×1,6 merupakan komponen struktur PSR persegi panjang, berbentuk boks, dan komponen struktur simetris ganda dan tunggal lain, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal G4 SNI 1729:2020.

$$\begin{aligned} \text{Kekuatan Geser Nominal } (V_n) &= 0,6 F_y A_w C_v 2 \\ &= 0,6 \times 210 \times 128 \times 1 \\ &= 16128 \text{ Nmm} \\ &= 16,128 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat Geser Desain } (\Phi V_n) &= 0,90 \times 16,128 \\ &= 14,515 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya geser *ultimate*.

$$V_u < \Phi V_n$$

0,262 kNmm < 14,5152 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya geser maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan geser nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{V_u}{\Phi V_n} = 0,02$.

e. Interaksi Gaya Aksial dan Lentur

Komponen struktur yang menahan gaya aksial dan lentur harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab H SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×1,6 merupakan komponen struktur simetris ganda yang menahan gaya lentur dan aksial, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal H1.1 SNI 1729:2020.

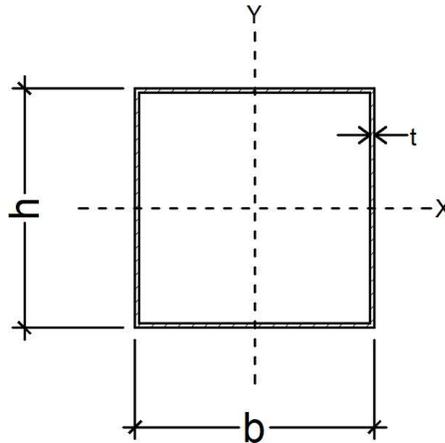
$$\begin{aligned}
\text{Kekuatan lentur perlu } (M_u) &= 86,51 \text{ kNmm} \\
\text{Kekuatan lentur tersedia } (\Phi M_n) &= 669,247 \text{ kNmm} \\
\text{Kekuatan aksial perlu } (P_u) &= 1,635 \text{ kN} \\
\text{Kekuatan aksial tersedia } (\Phi P_n) &= 10,132 \text{ kN} \\
\text{Rasio kekuatan aksial} &= \frac{P_u}{\Phi P_n} \\
&= \frac{1,635}{10,132} \\
&= 0,16 < 0,2
\end{aligned}$$

Karena rasio kekuatan aksial lebih kecil dari 0,2, maka persamaan dan batasan yang digunakan untuk interaksi gaya aksial dan lentur adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
&= \frac{P_n}{2\Phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \\
&= \frac{1,635}{2 \times 10,132} + \left(\frac{173,02}{1143,503} \right) \leq 1,0 \\
&= 0,232 \leq 1,0 \text{ OK}
\end{aligned}$$

Nilai interaksi antara gaya aksial dan lentur diperoleh sebesar sama dengan atau kurang dari satu. Hasil ini menunjukkan bahwa penampang profil *Hollow* 40×40×1,6 tidak mengalami *overstress* dan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan gaya aksial serta momen yang bekerja. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dapat dinyatakan aman.

4.6.2 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Parabola pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 4. 17 Penampang Profil *Hollow* 40×40×0,7

Pengecekan keamanan penampang profil dilakukan pada batang 8. Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil *Hollow* 40×40×0,7 yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 24 Properti Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	210	MPa
Tegangan Putus	F_u	340	MPa
Angka Poisson		0,3	

Tabel 4. 25 Geometri Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Tebal Dinding Desain	t	0,7	mm
Lebar Sayap	b	40	mm
Tinggi Badan	h	40	mm
Luas Penampang	A_g	110,4	mm ²
Radius Girasi sb, Y	r_y	16,04	mm
Modulus Plastis Penampang	Z	1621,88	mm ³
Modulus Elastis Penampang	S	1416,74	mm ³
Konstanta Torsi	J	42488,92	mm ⁴

Tabel 4. 26 Hasil Analisis Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	1,674	kN
Momen Maksimum	M_u	45,36	kNmm
Gaya Geser Maksimum	V_u	0,281	kNmm
Panjang Bentang Profil	L_b	0,8208	m
		820,8	mm
Momen pada 1/4 L	M_A	1,61	kNmm
Momen pada 1/2 L	M_B	3,87	kNmm
Momen pada 3/4 L	M_C	6,84	kNmm

a. Klasifikasi Penampang Profil

1) Klasifikasi Kelangsingan Penampang Profil

Kelangsingan merupakan perbandingan antara ketebalan sayap atau badan dengan lebarnya. Dalam kondisi tekan, penampang diklasifikasikan sebagai elemen tidak

langsing atau elemen langsing. Jika suatu elemen memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang melebihi batas rasio (λ_r) yang ditetapkan dalam **Tabel 2.4**, maka elemen tersebut dikategorikan sebagai langsing. Sebaliknya, jika rasio tersebut berada di bawah batas yang ditentukan, maka penampang disebut tidak langsing.

- Batasan rasio

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

- Rasio tebal-lebar

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{langsing}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{langsing}$$

Klasifikasi kelangsingan pada penampang *Hollow* 40×40×0,7 adalah penampang langsing.

2) Klasifikasi Kekompakan Penampang Profil

Komponen struktur yang menahan lentur memiliki dua kategori berdasarkan kekompakan penampangnya, yaitu kompak dan tidak kompak. Penampang dikatakan kompak jika sayapnya terhubung dengan badan serta memiliki rasio tebal-terhadap-

lebar (λ) yang tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak (λ_p) sesuai **Tabel 2.5**. Sementara itu, jika rasio (λ) melampaui (λ_p) tetapi masih berada dalam batas kelangsingan elemen tidak kompak (λ_r) berdasarkan **Tabel 2.5**, maka penampang tersebut dikategorikan sebagai tidak kompak.

- Batasan elemen kompak (λ_p)

$$\text{Sayap} = 1,12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,12\sqrt{\frac{200000}{210}} = 34,564$$

$$\text{Badan} = 2,42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,42\sqrt{\frac{200000}{210}} = 74,683$$

- Batasan elemen tidak kompak (λ_r)

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 5,7\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5,7\sqrt{\frac{200000}{210}} = 175,906$$

- Rasio tebal-lebar (λ)

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 34,564 \text{ maka, } \mathbf{nonkompak}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 < 74,683 \text{ maka, } \mathbf{kompak}$$

Nilai rasio lebar-terhadap-lebar bagian sayap melebihi batas kelangsingan elemen kompak. Sehingga penampang *Hollow* 40×40×0,7 adalah penampang nonkompak.

b. Perhitungan Komponen Struktur Tekan

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×0,7 dikategorikan sebagai penampang langsing. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.6**, tepatnya pada Bab E3. Kekuatan tekan desain (ϕcPn) dihitung berdasarkan kekuatan tekan nominal (Pn), yang diambil sebagai nilai terendah dari batas kegagalan akibat tekuk lentur dan tekuk torsi. Faktor ketahanan terhadap tekan (ϕc) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Panjang Efektif

Menurut SNI 1729:2020, faktor panjang efektif (K) yang digunakan dalam perhitungan kelangsingan komponen struktur ditetapkan sebesar 1,0. Untuk elemen struktur yang dirancang menahan tekan, rasio kelangsingan efektif (KL/r) disarankan tidak melebihi 200.

- Panjang efektif (K) = 1
- Panjang batang (L) = 875,39 mm
- Radius girasi (r) = 16,04 mm

$$\begin{aligned} \text{Rasio kelangsingan efektif} &= \frac{KL}{r} \\ &= \frac{875,39}{16,04} \\ &= 54,575 < 200 \text{ OK} \end{aligned}$$

3) Tekuk-Lentur

Tekuk lentur dipengaruhi oleh kelangsingan efektif suatu elemen, dengan kekuatan tekan ditentukan berdasarkan tegangan kritis (F_{cr}) dari penampang. Nilai tegangan kritis ini diperoleh dari teori tekuk euler. Tekuk terjadi pada sumbu dengan kelangsingan terbesar, yaitu sumbu dengan momen inersia atau jari-jari girasi terkecil. Adapun perhitungan tekuk lentur dilakukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Rasio kelangsingan efektif} &= \frac{KL}{r} \\ &= \frac{875,39}{16,04} \\ &= 54,575\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} &= 4,71 \sqrt{\frac{200000}{0,85 \times 210}} \\ &= 134,010\end{aligned}$$

Ternyata $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$, maka menurut SNI 1729:2020 terjadi tekuk lentur inelastis.

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Tekuk Euler } (F_e) &= \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \\ &= \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{1 \times 875,39}{16,04}\right)^2} \\ &= 662,056 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Kritis Tekuk Lentur Inelastis } (F_{cr}) &= [0,658^{\frac{F_y}{F_e}}] \times F_y \\ &= [0,658^{\frac{210}{662,056}}] \times 210 \\ &= 43,830 \text{ MPa}\end{aligned}$$

4) Kuat Tekan Nominal

Bersumber pada ketentuan umum di atas, kekuatan tekan nominal (P_n) harus diambil dari nilai terendah pada tegangan kritis keadaan tekuk lentur atau tekuk torsi.

$$F_{cr} \text{ tekuk lentur} = 43,830 \text{ MPa}$$

Nilai tegangan kritis yang dipakai untuk menghitung kekuatan tekan nominal yaitu 43,830 MPa.

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan nominal } (P_n) &= F_{cr} \times A_g \\ &= 43,830 \times 110,04 \\ &= 4823,033 \text{ N} \\ &= 4,823 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan nominal } (\Phi P_n) &= 0,90 \times 4,823 \\ &= 4,341 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tekan *ultimate*.

$$P_u < \Phi P_n$$

$$1,674 \text{ kN} < 4,341 \text{ kN}, \text{ maka AMAN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tekan maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{P_u}{\Phi P_n} = 0,39$.

c. Perhitungan Komponen Struktur Lentur

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×0,7 termasuk dalam komponen struktur dengan simetris ganda dan memiliki penampang kompak pada kedua bagiannya. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.7**, tepatnya pada Bab F7. Kekuatan lentur desain ($\Phi_b M_n$) dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal (M_n), yang diambil sebagai nilai terendah sesuai dengan batas kegagalan akibat leleh (momen plastis) dan tekuk torsi-lateral. Faktor ketahanan terhadap lentur (Φ_b) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Kondisi Leleh

Ketika semua daerah dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan kondisi plastis. Tahanan momen nominal dalam kondisi ini dinamakan momen plastis (M_p), yang besarnya didefinisikan sebagai tegangan leleh dikali modulus penampang plastis, Adapun momen yang dipertimbangkan yakni momen arah sumbu lemah.

Kuat lentur plastis (M_p) ialah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh, harus diambil yang lebih kecil dari $f_y \times Z$ atau $1,5 M_y$. Berikut adalah perhitungan menentukan batas momen plastis.

$$\begin{aligned} \text{Momen leleh } (M_y) &= f_y \times Z \\ &= 210 \times 1621,88 \\ &= 340594,8 \text{ Nmm} \\ &= 340,595 \text{ kNmm} \\ 1,5 M_y &= 1,5 (f_y \times Z) \\ &= 1,5 \times 340594,8 \\ &= 510892,2 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$= 510,89 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen plastis } (M_p) &= f_y \times Z \\ &= 210 \times 1621,88 \\ &= 340594,8 \text{ Nmm} \\ &= 340,595 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Ternyata $M_p < 1,5 M_y$, sehingga kuat lentur plastis $M_p = 340,595 \text{ kNmm}$. Oleh karena itu, momen nominal kondisi leleh ialah sebesar $M_n = M_p = 340,595 \text{ kNmm}$.

3) Tekuk Lokal Sayap

Tekuk lokal sayap terjadi ketika sayap balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena sayap yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow 40×40×0,7*, elemen yang terjadi adalah nonkompak dan langsing.

Untuk penampang dengan sayap nonkompak,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(3,57 \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4,0 \right) \leq M_p$$

$$M_n = 340594,8 - (340594,8 - 210 \times 1416,74) \left(3,57 \frac{40}{0,7} \sqrt{\frac{210}{200000}} - 4,0 \right) \leq M_p$$

$$M_n = 228142,251 \text{ Nmm} \leq 340594,8 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 228,142 \text{ kNmm} \leq 340,595 \text{ kNmm} \text{ OK}$$

Untuk penampang berbentuk boks,

$$b_e = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left[1 - \frac{0,34}{b/t_f} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right] \leq b$$

$$b_e = 1,92 \times 0,7 \sqrt{\frac{200000}{210}} \left[1 - \frac{0,34}{40/0,7} \sqrt{\frac{200000}{210}} \right] \leq b$$

$$b_e = 33,861 \leq 40 \text{ OK}$$

Untuk penampang dengan sayap langsing,

$$M_n = F_y S_e$$

$$M_n = 210 \times 33,861$$

$$M_n = 7110,756 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 7,111 \text{ kNmm}$$

4) Tekuk Lokal Badan

Tekuk lokal badan terjadi ketika badan balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena badan yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow 40×40×0,7*, elemen yang terjadi adalah kompak dan langsing.

Untuk penampang dengan badan langsing,

$$\begin{aligned} \text{Leleh sayap tekan } (M_n) &= R_{pg} F_y S \\ &= \frac{240 \times 0,7}{(40 \times 0,7)} \times 210 \times 1416,74 \\ &= 850044 \text{ Nmm} \\ &= 850,044 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{cr} &= \frac{0,9 E K_c}{\left(\frac{L}{t_f}\right)^2} \\ &= \frac{0,9 \times 200000 \times 4,0}{\left(\frac{40}{0,7}\right)^2} \end{aligned}$$

$$= 220,5 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Tekuk lokal sayap tekan } (M_n) &= R_{pg} F_{cr} S_{xc} \\ &= \frac{240 \times 0,7}{(40 \times 0,7)} \times 220,5 \times 1416,74 \\ &= 892546,2 \text{ Nmm} \\ &= 892,546 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

5) Tekuk Torsi-Lateral

Tekuk torsi lateral terjadi ketika elemen struktur mengalami perpindahan lateral dan puntiran akibat beban yang diberikan. Keberadaan tekuk lateral bergantung pada panjang bentang elemen struktur. Klasifikasi panjang bentang penampang meliputi beberapa kategori berikut:

- Bentang pendek ($L_b \leq L_p$)
- Bentang menengah ($L_b < L_b \leq L_p$)
- Bentang panjang ($L_b > L_r$)

Di mana L_b adalah panjang bentang profil, sedangkan L_p dan L_r masing-masing merupakan batas panjang bentang pendek dan menengah. Sesuai dengan SNI 1729:2020, berikut adalah klasifikasi panjang bentang untuk profil *Hollow* $40 \times 40 \times 0,7$.

$$\begin{aligned} L_b &= 820,8 \text{ mm} \\ L_p &= 0,13 E_r \frac{I_{Ag}}{y \sqrt{\frac{M_p}{M_y}}} \\ &= 1,76 \times 200000 \times 16,04 \sqrt{\frac{42488,92 \times 110,04}{340594,8}} \\ &= 1545154,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_b \leq L_p$$

$$820,8 \text{ mm} \leq 1545154,255 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, ternyata penampang profil *Hollow* 40×40×0,7 tergolong bentang pendek jadi keadaan batas tekuk torsi-lateral tidak berlaku.

6) Kuat Lentur Nominal

Setelah melakukan perhitungan komponen struktur lentur di atas, selanjutnya adalah memilih momen nominal yang paling menentukan dari masing-masing kondisi batas.

$$M_n \text{ berdasarkan kondisi leleh} = 340,595 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal sayap nonkompak} = 228,142 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal sayap langsing} = 7,111 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal badan langsing (leleh)} = 850,044 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal badan langsing (tekuk lokal)} = 892,646 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ yang dipakai} = 892,646 \text{ kNmm}$$

Sehingga,

$$\text{Kuat lentur nominal } (M_n) = 892,646 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat lentur desain } (\Phi M_n) &= 0,9 \times 892,646 \text{ kNmm} \\ &= 803,292 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya lentur *ultimate*.

$$M_u < \Phi M_n$$

45,36 kNmm < 803,292 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya lentur maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan lentur nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow*

40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{M^u}{\Phi M_n} = 0,06$.

d. Perhitungan Komponen Struktur Geser

Komponen struktur geser harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab G SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×0,7 merupakan komponen struktur PSR persegi panjang, berbentuk boks, dan komponen struktur simetris ganda dan tunggal lain, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal G4 SNI 1729:2020.

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan Geser Nominal } (V_n) &= 0,6 F_y A_w C_v 2 \\ &= 0,6 \times 210 \times 56 \times 1 \\ &= 7056 \text{ Nmm} \\ &= 7,056 \text{ kNmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kuat Geser Desain } (\Phi V_n) &= 0,90 \times 7,056 \\ &= 6,3504 \text{ kNmm}\end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya geser *ultimate*.

$$V_u < \Phi V_n$$

0,281 kNmm < 6,3504 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya geser maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan geser nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{V^u}{\Phi V_n} = 0,044$.

e. Interaksi Gaya Aksial dan Lentur

Komponen struktur yang menahan gaya aksial dan lentur harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab H SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×0,7 merupakan komponen struktur simetris ganda yang menahan gaya lentur dan aksial, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal H1.1 SNI 1729:2020.

$$\text{Kekuatan lentur perlu } (M_u) = 96,07 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan lentur tersedia } (\Phi M_n) = 803,292 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan aksial perlu } (P_u) = 1,674 \text{ kN}$$

$$\text{Kekuatan aksial tersedia } (\Phi P_n) = 4,341 \text{ kN}$$

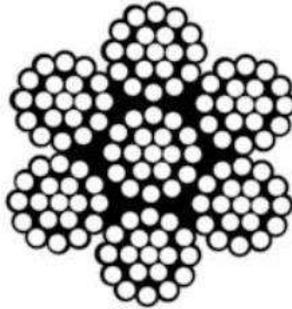
$$\begin{aligned} \text{Rasio kekuatan aksial} &= \frac{P_u}{\Phi P_n} \\ &= \frac{1,674}{4,341} \\ &= 0,39 \geq 0,2 \end{aligned}$$

Karena rasio kekuatan aksial lebih besar dari 0,2, maka persamaan dan batasan yang digunakan untuk interaksi gaya aksial dan lentur adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} &= \frac{P_n}{\Phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \\ &= \frac{1,674}{4,341} + \frac{8}{9} \left(\frac{90,72}{1606,583} \right) \leq 1,0 \\ &= 0,436 \leq 1,0 \text{ OK} \end{aligned}$$

Nilai interaksi antara gaya aksial dan lentur diperoleh sebesar sama dengan atau kurang dari satu. Hasil ini menunjukkan bahwa penampang profil *Hollow* 40×40×0,7 tidak mengalami *overstress* dan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan gaya aksial serta momen yang bekerja. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×0,7 dapat dinyatakan aman.

4.6.3 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Lingkaran pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 4. 18 Penampang Profil Kawat Seling 1 mm

Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil kawat seling 1 mm yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 27 Properti Penampang Kawat Seling 1 mm

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	1100	MPa
Tegangan Putus	F_u	1570	MPa

Tabel 4. 28 Geometri Penampang Kawat Seling 1 mm

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Diameter Penampang	D	1,6	mm
Luas Penampang	A_g	0,7854	mm ²

Tabel 4. 29 Hasil Analisis Penampang Kawat Seling 1 mm

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	0,403	kN

a. Perhitungan Komponen Struktur Tarik

Menurut SNI 1729:2020, Kekuatan tarik desain (ϕP_n) harus diambil nilai terendah berdasarkan keadaan batas.

1) Kuat Tarik Nominal

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik } (P_n) &= F_u \times A_g \\ &= 1570 \times 0,7850 \\ &= 1232,45 \text{ N} \\ &= 123,245 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,6 \times 123,245 \\ &= 73,947 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil kawat seling 1 mm diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tarik *ultimate* maka digunakan nilai kapasitas nominal terkecil.

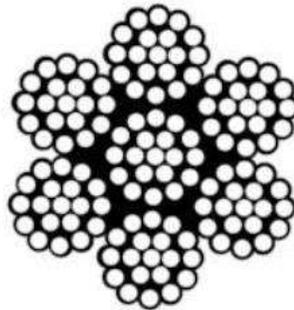
$$P_u < \Phi P_n$$

0,403 kN < 73,947 kN, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tarik maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil kawat

seling 1 mm dinyatakan aman terhadap gaya tarik yang bekerja, dengan rasio $\frac{P^u}{\Phi P_n} = 0,005$.

4.6.4 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Parabola pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 4. 19 Penampang Profil Kawat Seling 1 mm

Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil kawat seling 1 mm yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 30 Properti Penampang Kawat Seling 1 mm

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	1100	MPa
Tegangan Putus	F_u	1570	MPa

Tabel 4. 31 Geometri Penampang Kawat Seling 1 mm

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Diameter Penampang	D	1,6	mm
Luas Penampang	A_g	0,7854	mm ²

Tabel 4. 32 Hasil Analisis Penampang Kawat Seling 1 mm

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	0,504	kN

b. Perhitungan Komponen Struktur Tarik

Menurut SNI 1729:2020, Kekuatan tarik desain (ϕP_n) harus diambil nilai terendah berdasarkan keadaan batas.

2) Kuat Tarik Nominal

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik } (P_n) &= F_u \times A_g \\ &= 1570 \times 0,7850 \\ &= 1232,45 \text{ N} \\ &= 123,245 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,6 \times 123,245 \\ &= 73,947 \text{ kN} \end{aligned}$$

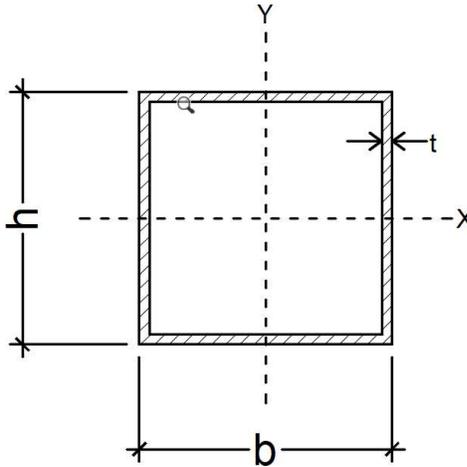
Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil kawat seling 1 mm diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tarik *ultimate* maka digunakan nilai kapasitas nominal terkecil.

$$P_u < \Phi P_n$$

0,504 kN < 73,947 kN, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tarik maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil kawat seling 1 mm dinyatakan aman terhadap gaya tarik yang bekerja, dengan rasio $\frac{P^u}{\phi P_n} = 0,006$.

4.6.5 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Lingkaran pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 20 Penampang Profil *Hollow* 40×40×1,6

Pengecekan keamanan penampang profil dilakukan pada batang 1. Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil *Hollow* 40×40×1,6 yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 33 Properti Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	210	MPa
Tegangan Putus	F_u	340	MPa
Angka Poisson		0,3	

Tabel 4. 34 Geometri Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Tebal Dinding Desain	t	1,6	mm
Lebar Sayap	b	40	mm
Tinggi Badan	h	40	mm
Luas Penampang	A_g	245,76	mm ²
Radius Girasi sb, Y	r_y	15,69	mm
Modulus Plastis Penampang	Z	3540,99	mm ³
Modulus Elastis Penampang	S	3025,14	mm ³
Konstanta Torsi	J	90596,97	mm ⁴

Tabel 4. 35 Hasil Analisis Penampang *Hollow* 40×40×1,6

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	1,449	kN
Momen Maksimum	M_u	87,41	kNmm
Gaya Geser Maksimum	V_u	0,229	kNmm
Panjang Bentang Profil	L_b	0,75	m
		750	mm
Momen pada 1/4 L	M_A	36,46	kNmm
Momen pada 1/2 L	M_B	48,1	kNmm
Momen pada 3/4 L	M_C	61,2	kNmm

c. Klasifikasi Penampang Profil

1) Klasifikasi Kelangsingan Penampang Profil

Kelangsingan merupakan perbandingan antara ketebalan sayap atau badan dengan lebarnya. Dalam kondisi tekan, penampang diklasifikasikan sebagai elemen tidak

langsing atau elemen langsing. Jika suatu elemen memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang melebihi batas rasio (λ_r) yang ditetapkan dalam **Tabel 2.4**, maka elemen tersebut dikategorikan sebagai langsing. Sebaliknya, jika rasio tersebut berada di bawah batas yang ditentukan, maka penampang disebut tidak langsing.

- Batasan rasio

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

- Rasio tebal-lebar

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \end{aligned}$$

$$= 25 < 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{\text{tidak langsing}}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \end{aligned}$$

$$= 25 < 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{\text{tidak langsing}}$$

Klasifikasi kelangsingan pada penampang *Hollow* 40×40×1,6 adalah penampang tidak langsing.

2) Klasifikasi Kekompakan Penampang Profil

Komponen struktur yang menahan lentur memiliki dua kategori berdasarkan kekompakan penampangnya, yaitu kompak dan tidak kompak. Penampang dikatakan kompak jika sayapnya terhubung dengan badan serta memiliki rasio tebal-terhadap-

lebar (λ) yang tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak (λ_p) sesuai **Tabel 2.5**. Sementara itu, jika rasio (λ) melampaui (λ_p) tetapi masih berada dalam batas kelangsingan elemen tidak kompak (λ_r) berdasarkan **Tabel 2.5**, maka penampang tersebut dikategorikan sebagai tidak kompak.

- Batasan elemen kompak (λ_p)

$$\text{Sayap} = 1,12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,12\sqrt{\frac{200000}{210}} = 34,564$$

$$\text{Badan} = 2,42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,42\sqrt{\frac{200000}{210}} = 74,683$$

- Batasan elemen tidak kompak (λ_r)

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 5,7\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5,7\sqrt{\frac{200000}{210}} = 175,906$$

- Rasio tebal-lebar (λ)

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 34,564 \text{ maka, } \mathbf{kompak} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{1,6} \\ &= 25 < 74,683 \text{ maka, } \mathbf{kompak} \end{aligned}$$

Nilai rasio lebar-terhadap-lebar bagian sayap maupun badan tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak. Sehingga penampang *Hollow* 40×40×1,6 adalah penampang kompak.

d. Perhitungan Komponen Struktur Tarik

Menurut SNI 1729:2020, Kekuatan tarik desain (ϕP_n) harus diambil nilai terendah berdasarkan keadaan batas.

Diketahui :

- Panjang sambungan (l) = 148,8 mm
- Jumlah baut rencana = 5 buah
- Diameter lubang = 8 mm
- Tebal plat = 1,2 mm
- Luas bruto penampang (A_g) = 245,76 mm²
- Luas Neto (A_n) = 197,76 mm²
- Menentukan Faktor *Shear Lag* (U)

$$x = \frac{B^2}{4(B+H)}$$

$$= \frac{40^2}{4(40+40)}$$

$$= 5$$

$$U = 1 - \frac{x}{l}$$

$$= 1 - \frac{5}{148,8}$$

$$= 0,966$$

$$\text{Luas Neto Efektif } (A_e) = A_n \times U$$

$$= 197,76 \times 0,966$$

$$= 191,115 \text{ mm} > 208,896 \text{ mm, maka AMAN}$$

3) Kuat Tarik Nominal

$$\begin{aligned} \text{Kuat leleh tarik } (P_n) &= F_y \times A_g \\ &= 210 \times 245,76 \\ &= 51609,6 \text{ N} \\ &= 51,610 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat leleh tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,90 \times 51,610 \\ &= 46,449 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik } (P_n) &= F_u \times A_e \\ &= 340 \times 245,76 \\ &= 64979,045 \text{ N} \\ &= 64,979 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat keruntuhan tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,75 \times 64,979 \\ &= 48,734 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tarik *ultimate* maka digunakan nilai kapasitas nominal terkecil.

$$P_u < \Phi P_n$$

$$1,449 \text{ kN} < 46,449 \text{ kN, maka AMAN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tarik maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tarik yang bekerja, dengan rasio $\frac{P^u}{\Phi P_n} = 0,03$.

e. Perhitungan Komponen Struktur Lentur

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×1,6 termasuk dalam komponen struktur dengan simetris ganda dan memiliki penampang kompak pada kedua bagiannya. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.7**, tepatnya pada Bab F7. Kekuatan lentur desain ($\Phi_b M_n$) dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal (M_n), yang diambil sebagai nilai terendah sesuai dengan batas kegagalan akibat leleh (momen plastis) dan tekuk torsi-lateral. Faktor ketahanan terhadap lentur (Φ_b) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Kondisi Leleh

Ketika semua daerah dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan kondisi plastis. Tahanan momen nominal dalam kondisi ini dinamakan momen plastis (M_p), yang besarnya didefinisikan sebagai tegangan leleh dikali modulus penampang plastis, Adapun momen yang dipertimbangkan yakni momen arah sumbu lemah.

Kuat lentur plastis (M_p) ialah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh, harus diambil yang lebih kecil dari $f_y \times Z$ atau $1,5 M_y$. Berikut adalah perhitungan menentukan batas momen plastis.

$$\begin{aligned}
 \text{Momen leleh } (M_y) &= f_y \times Z \\
 &= 210 \times 3540,99 \\
 &= 743607,9 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 743,608 \text{ kNmm} \\
1,5 M_y &= 1,5 (f_y \times Z) \\
&= 1,5 \times 743607,9 \\
&= 1115411,9 \text{ Nmm} \\
&= 1115,412 \text{ kNmm} \\
\text{Momen plastis } (M_p) &= f_y \times Z \\
&= 210 \times 3540,99 \\
&= 743607,9 \text{ Nmm} \\
&= 743,608 \text{ kNmm}
\end{aligned}$$

Ternyata $M_p < 1,5 M_y$, sehingga kuat lentur plastis $M_p = 743,608 \text{ kNmm}$. Oleh karena itu, momen nominal kondisi leleh ialah sebesar $M_n = M_p = 743,608 \text{ kNmm}$.

3) Tekuk Lokal Sayap

Tekuk lokal sayap terjadi ketika sayap balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena sayap yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow* 40×40×1,6, elemen yang terjadi adalah kompak dan tidak langsing maka keadaan batas tekuk lokal sayap tidak berlaku.

4) Tekuk Lokal Badan

Tekuk lokal badan terjadi ketika badan balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena badan yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu

elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow* 40×40×1,6, elemen yang terjadi adalah kompak dan tidak langsing maka keadaan batas tekuk lokal badan tidak berlaku.

5) Tekuk Torsi-Lateral

Tekuk torsi lateral terjadi ketika elemen struktur mengalami perpindahan lateral dan puntiran akibat beban yang diberikan. Keberadaan tekuk lateral bergantung pada panjang bentang elemen struktur. Klasifikasi panjang bentang penampang meliputi beberapa kategori berikut:

- Bentang pendek ($L_b \leq L_p$)
- Bentang menengah ($L_b < L_b \leq L_p$)
- Bentang panjang ($L_b > L_r$)

Di mana L_b adalah panjang bentang profil, sedangkan L_p dan L_r masing-masing merupakan batas panjang bentang pendek dan menengah. Sesuai dengan SNI 1729:2020, berikut adalah klasifikasi panjang bentang untuk profil *Hollow* 40×40×1,6.

$$\begin{aligned}
 L_b &= 750 \text{ mm} \\
 L_p &= 0,13 E_r \sqrt{\frac{I_{Ag}}{M_p}} \\
 &= 0,13 \times 200000 \times 15,69 \sqrt{\frac{90596,97 \times 245,76}{635279,4}} \\
 &= 2415051,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$L_b \leq L_p$$

$$750 \text{ mm} \leq 2415051,2 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, ternyata penampang profil *Hollow* 40×40×1,6 tergolong bentang pendek jadi keadaan batas tekuk torsi-lateral tidak berlaku.

6) Kuat Lentur Nominal

Setelah melakukan perhitungan komponen struktur lentur di atas, selanjutnya adalah memilih momen nominal yang paling menentukan dari masing-masing kondisi batas.

$$M_n \text{ berdasarkan kondisi leleh} = 743,608 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ yang dipakai} = 743,608 \text{ kNmm}$$

Sehingga,

$$\text{Kuat lentur nominal } (M_n) = 743,608 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat lentur desain } (\Phi M_n) &= 0,9 \times 743,608 \\ &= 669,247 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya lentur *ultimate*.

$$M_u < \Phi M_n$$

$$87,41 \text{ kNmm} < 669,247 \text{ kNmm, maka AMAN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya lentur maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan lentur nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{M_u}{\Phi M_n} = 0,15$.

f. Perhitungan Komponen Struktur Geser

Komponen struktur geser harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab G SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×1,6 merupakan komponen struktur PSR persegi panjang, berbentuk boks, dan komponen struktur simetris ganda dan tunggal lain, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal G4 SNI 1729:2020.

$$\begin{aligned}
\text{Kekuatan Geser Nominal } (V_n) &= 0,6 F_y A_w C_v 2 \\
&= 0,6 \times 210 \times 128 \times 1 \\
&= 16128 \text{ Nmm} \\
&= 16,128 \text{ kNmm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Kuat Geser Desain } (\Phi V_n) &= 0,90 \times 16,128 \\
&= 14,515 \text{ kNmm}
\end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×1,6 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya geser *ultimate*.

$$V_u < \Phi V_n$$

0,229 kNmm < 14,5152 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya geser maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan geser nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{V_u}{\Phi V_n} = 0,02$.

g. Interaksi Gaya Aksial dan Lentur

Komponen struktur yang menahan gaya aksial dan lentur harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab H SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×1,6 merupakan komponen struktur simetris ganda yang menahan gaya lentur dan aksial, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal H1.1 SNI 1729:2020.

$$\text{Kekuatan lentur perlu } (M_u) = 181,29 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan lentur tersedia } (\Phi M_n) = 571,751 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan aksial perlu } (P_u) = 1,449 \text{ kN}$$

$$\text{Kekuatan aksial tersedia } (\Phi P_n) = 46,449 \text{ kN}$$

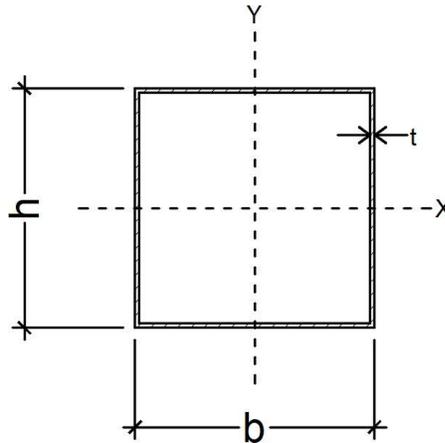
$$\begin{aligned}
 \text{Rasio kekuatan aksial} &= \frac{P^u}{\Phi P_n} \\
 &= \frac{1,449}{46,449} \\
 &= 0,03 < 0,2
 \end{aligned}$$

Karena rasio kekuatan aksial lebih kecil dari 0,2, maka persamaan dan batasan yang digunakan untuk interaksi gaya aksial dan lentur adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P_n}{2\Phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \\
 &= \frac{1,449}{2 \times 46,449} + \left(\frac{174,82}{1143,503} \right) \leq 1,0 \\
 &= 0,168 \leq 1,0 \text{ OK}
 \end{aligned}$$

Nilai interaksi antara gaya aksial dan lentur diperoleh sebesar sama dengan atau kurang dari satu. Hasil ini menunjukkan bahwa penampang profil *Hollow* 40×40×1,6 tidak mengalami *overstress* dan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan gaya aksial serta momen yang bekerja. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×1,6 dapat dinyatakan aman.

4.6.6 Kontrol Desain Penampang Model Jembatan Lengkung Parabola pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 21 Penampang Profil *Hollow* 40×40×0,7

Pengecekan keamanan penampang profil dilakukan pada batang 1. Data-data yang diperlukan untuk kontrol penampang profil yaitu properti penampang, geometri penampang, dan hasil analisis penampang. Berikut adalah data-data dari profil *Hollow* 40×40×0,7 yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 36 Properti Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Properti Penampang		Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas Baja	E	200000	MPa
Modulus Elastis Geser Baja	G	78000	MPa
Tegangan Leleh	F_y	210	MPa
Tegangan Putus	F_u	340	MPa
Angka Poisson		0,3	

Tabel 4. 37 Geometri Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Geometri Penampang		Nilai	Satuan
Tebal Dinding Desain	t	0,7	mm
Lebar Sayap	b	40	mm
Tinggi Badan	h	40	mm
Luas Penampang	A_g	110,4	mm ²
Radius Girasi sb, Y	r_y	16,04	mm
Modulus Plastis Penampang	Z	1621,88	mm ³
Modulus Elastis Penampang	S	1416,74	mm ³
Konstanta Torsi	J	42488,92	mm ⁴

Tabel 4. 38 Hasil Analisis Penampang *Hollow* 40×40×0,7

Hasil Analisis		Nilai	Satuan
Gaya Aksial Maksimum	P_u	1,531	kN
Momen Maksimum	M_u	32,55	kNmm
Gaya Geser Maksimum	V_u	0,119	kNmm
Panjang Bentang Profil	L_b	0,75	m
		750	mm
Momen pada 1/4 L	M_A	2,44	kNmm
Momen pada 1/2 L	M_B	4,24	kNmm
Momen pada 3/4 L	M_C	6,69	kNmm

a. Klasifikasi Penampang Profil

1) Klasifikasi Kelangsingan Penampang Profil

Kelangsingan merupakan perbandingan antara ketebalan sayap atau badan dengan lebarnya. Dalam kondisi tekan, penampang diklasifikasikan sebagai elemen tidak

langsing atau elemen langsing. Jika suatu elemen memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang melebihi batas rasio (λ_r) yang ditetapkan dalam **Tabel 2.4**, maka elemen tersebut dikategorikan sebagai langsing. Sebaliknya, jika rasio tersebut berada di bawah batas yang ditentukan, maka penampang disebut tidak langsing.

- Batasan rasio

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 1,4\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

- Rasio tebal-lebar

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{langsing}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 43,205 \text{ maka, penampang } \mathbf{langsing}$$

Klasifikasi kelangsingan pada penampang *Hollow* 40×40×0,7 adalah penampang langsing.

2) Klasifikasi Kekompakan Penampang Profil

Komponen struktur yang menahan lentur memiliki dua kategori berdasarkan kekompakan penampangnya, yaitu kompak dan tidak kompak. Penampang dikatakan

kompak jika sayapnya terhubung dengan badan serta memiliki rasio tebal-terhadap-lebar (λ) yang tidak melebihi batas kelangsingan elemen kompak (λ_p) sesuai **Tabel 2.5**. Sementara itu, jika rasio (λ) melampaui (λ_p) tetapi masih berada dalam batas kelangsingan elemen tidak kompak (λ_r) berdasarkan **Tabel 2.5**, maka penampang tersebut dikategorikan sebagai tidak kompak.

- Batasan elemen kompak (λ_p)

$$\text{Sayap} = 1,12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,12\sqrt{\frac{200000}{210}} = 34,564$$

$$\text{Badan} = 2,42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,42\sqrt{\frac{200000}{210}} = 74,683$$

- Batasan elemen tidak kompak (λ_r)

$$\text{Sayap} = 1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,4\sqrt{\frac{200000}{210}} = 43,205$$

$$\text{Badan} = 5,7\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5,7\sqrt{\frac{200000}{210}} = 175,906$$

- Rasio tebal-lebar (λ)

$$\begin{aligned} \text{Sayap} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 > 34,564 \text{ maka, } \mathbf{nonkompak}$$

$$\begin{aligned} \text{Badan} &= \frac{b}{t} \\ &= \frac{40}{0,7} \end{aligned}$$

$$= 57,143 < 74,683 \text{ maka, } \mathbf{kompak}$$

Nilai rasio lebar-terhadap-lebar bagian sayap melebihi batas kelangsingan elemen kompak. Sehingga penampang *Hollow* 40×40×0,7 adalah penampang nonkompak.

b. Perhitungan Komponen Struktur Tarik

Menurut SNI 1729:2020, Kekuatan tarik desain (ϕP_n) harus diambil nilai terendah berdasarkan keadaan batas.

Diketahui :

- Panjang sambungan (l) = 148,8 mm
- Jumlah baut rencana = 5 buah
- Diameter lubang = 8 mm
- Tebal plat = 1,2 mm
- Luas bruto penampang (A_g) = 110,04 mm²
- Luas Neto (A_n) = 62,04 mm²
- Menentukan Faktor *Shear Lag* (U)

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{B^2}{4(B+H)} \\
 &= \frac{40^2}{4(40+40)} \\
 &= 5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U &= 1 - \frac{x}{l} \\
 &= 1 - \frac{5}{148,8} \\
 &= 0,966
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Neto Efektif } (A_e) &= A_n \times U \\
 &= 62,04 \times 0,966 \\
 &= 59,955 \text{ mm} < 93,534 \text{ mm, maka } \mathbf{AMAN}
 \end{aligned}$$

4) Kuat Tarik Nominal

$$\begin{aligned}\text{Kuat leleh tarik } (P_n) &= F_y \times A_g \\ &= 210 \times 110,04 \\ &= 23108,4 \text{ N} \\ &= 23,108 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kuat leleh tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,90 \times 23,108 \\ &= 20,798 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kuat keruntuhan tarik } (P_n) &= F_u \times A_e \\ &= 340 \times 59,955 \\ &= 20384,810 \text{ N} \\ &= 20,385 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kuat keruntuhan tarik nominal } (\Phi P_n) &= 0,75 \times 20,385 \\ &= 15,289 \text{ kN}\end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya tarik *ultimate* maka digunakan nilai kapasitas nominal terkecil.

$$P_u < \Phi P_n$$

1,531 kN < 15,289 kN, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya tarik maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan tekan nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow*

40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tarik yang bekerja, dengan rasio $\frac{P^u}{\Phi P_n} = 0,10$.

b. Perhitungan Komponen Struktur Lentur

1) Ketentuan Umum

Profil *Hollow* 40×40×0,7 termasuk dalam komponen struktur dengan simetris ganda dan memiliki penampang kompak pada kedua bagiannya. Oleh karena itu, pemilihan profil untuk penerapannya mengacu pada **Tabel 2.7**, tepatnya pada Bab F7. Kekuatan lentur desain ($\Phi_b M_n$) dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal (M_n), yang diambil sebagai nilai terendah sesuai dengan batas kegagalan akibat leleh (momen plastis) dan tekuk torsi-lateral. Faktor ketahanan terhadap lentur (Φ_b) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 0,90.

2) Kondisi Leleh

Ketika semua daerah dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan kondisi plastis. Tahanan momen nominal dalam kondisi ini dinamakan momen plastis (M_p), yang besarnya didefinisikan sebagai tegangan leleh dikali modulus penampang plastis, Adapun momen yang dipertimbangkan yakni momen arah sumbu lemah.

Kuat lentur plastis (M_p) ialah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh, harus diambil yang lebih kecil dari $f_y \times Z$ atau $1,5 M_y$. Berikut adalah perhitungan menentukan batas momen plastis.

$$\begin{aligned} \text{Momen leleh } (M_y) &= f_y \times Z \\ &= 210 \times 1621,88 \\ &= 340594,8 \text{ Nmm} \\ &= 340,595 \text{ kNmm} \\ 1,5 M_y &= 1,5 (f_y \times Z) \end{aligned}$$

$$= 1,5 \times 340594,8$$

$$= 510892,2 \text{ Nmm}$$

$$= 510,892 \text{ kNmm}$$

$$\text{Momen plastis } (M_p) = f_y \times Z$$

$$= 210 \times 1621,88$$

$$= 340594,8 \text{ Nmm}$$

$$= 340,595 \text{ kNmm}$$

Ternyata $M_p < 1,5 M_y$, sehingga kuat lentur plastis $M_p = 340,595 \text{ kNmm}$. Oleh karena itu, momen nominal kondisi leleh ialah sebesar $M_n = M_p = 340,595 \text{ kNmm}$.

3) Tekuk Lokal Sayap

Tekuk lokal sayap terjadi ketika sayap balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena sayap yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow 40×40×0,7*, elemen yang terjadi adalah nonkompak dan langsing.

Untuk penampang dengan sayap nonkompak,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(3,57 \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4,0 \right) \leq M_p$$

$$M_n = 340594,8 - (340594,8 - 210 \times 1416,74) \left(3,57 \frac{40}{0,7} \sqrt{\frac{210}{200000}} - 4,0 \right) \leq M_p$$

$$M_n = 228142,251 \text{ Nmm} \leq 340594,8 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 228,142 \text{ kNmm} \leq 340,595 \text{ kNmm} \text{ OK}$$

Untuk penampang berbentuk boks,

$$b_e = 1,92t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left[1 - \frac{0,34}{b/tf} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right] \leq b$$

$$b_e = 1,92 \times 0,7 \sqrt{\frac{200000}{210}} \left[1 - \frac{0,34}{40/0,7} \sqrt{\frac{200000}{210}} \right] \leq b$$

$$b_e = 33,861 \leq 40 \text{ OK}$$

Untuk penampang dengan sayap langsing,

$$M_n = F_y S_e$$

$$M_n = 210 \times 33,861$$

$$M_n = 7110,756 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 7,111 \text{ kNmm}$$

4) Tekuk Lokal Badan

Tekuk lokal badan terjadi ketika badan balok baja mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan penuh plastisnya. Fenomena ini disebabkan karena badan yang terlalu tipis, beban tekan tinggi, dan kurangnya perkuatan lateral. Klasifikasi elemen sayap baja terbagi dalam tiga kategori berdasarkan lebar-terhadap-tebal (*b/t ratio*) yaitu elemen kompak, elemen nonkompak, elemen langsing. Pada profil *Hollow 40×40×0,7*, elemen yang terjadi adalah kompak dan langsing.

Untuk penampang dengan badan langsing,

- Leleh sayap tekan (M_n) $= R_{pg} F_y S$

$$= \frac{240 \times 0,7}{(40 \times 0,7)} \times 210 \times 1416,74$$

$$= 850044 \text{ Nmm}$$

$$= 850,044 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned}
 F_{cr} &= \frac{0,9EK_c}{\left(\frac{L_b}{t_f}\right)^2} \\
 &= \frac{0,9 \times 200000 \times 4,0}{\left(\frac{40}{0,7}\right)^2} \\
 &= 220,5 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- Tekuk lokal sayap tekan (M_n) = $R_{pg}F_{cr}S_{xc}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{240 \times 0,7}{(40 \times 0,7)} \times 220,5 \times 1416,74 \\
 &= 892546,2 \text{ Nmm} \\
 &= 892,546 \text{ kNmm}
 \end{aligned}$$

5) Tekuk Torsi-Lateral

Tekuk torsi lateral terjadi ketika elemen struktur mengalami perpindahan lateral dan puntiran akibat beban yang diberikan. Keberadaan tekuk lateral bergantung pada panjang bentang elemen struktur. Klasifikasi panjang bentang penampang meliputi beberapa kategori berikut:

- Bentang pendek ($L_b \leq L_p$)
- Bentang menengah ($L_b < L_b \leq L_p$)
- Bentang panjang ($L_b > L_r$)

Di mana L_b adalah panjang bentang profil, sedangkan L_p dan L_r masing-masing merupakan batas panjang bentang pendek dan menengah. Sesuai dengan SNI 1729:2020, berikut adalah klasifikasi panjang bentang untuk profil *Hollow* 40×40×0,7.

$$\begin{aligned}
 L_b &= 750 \text{ mm} \\
 L_p &= 0,13 Er \sqrt{\frac{I_{Ag}}{M_p}} \\
 &= 1,76 \times 200000 \times 16,04 \sqrt{\frac{42488,92 \times 110,04}{340594,8}}
 \end{aligned}$$

$$= 1545154,3 \text{ mm}$$

$$L_b \leq L_p$$

$$750 \text{ mm} \leq 1545154,255 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, ternyata penampang profil *Hollow* 40×40×0,7 tergolong bentang pendek jadi keadaan batas tekuk torsi-lateral tidak berlaku.

6) Kuat Lentur Nominal

Setelah melakukan perhitungan komponen struktur lentur di atas, selanjutnya adalah memilih momen nominal yang paling menentukan dari masing-masing kondisi batas.

$$M_n \text{ berdasarkan kondisi leleh} = 340,595 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal sayap nonkompak} = 228,142 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal sayap langsing} = 7,111 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal badan langsing (leleh)} = 850,044 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ berdasarkan tekuk lokal badan langsing (tekuk lokal)} = 892,646 \text{ kNmm}$$

$$M_n \text{ yang dipakai} = 892,646 \text{ kNmm}$$

Sehingga,

$$\text{Kuat lentur nominal } (M_n) = 892,646 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kuat lentur desain } (\Phi M_n) = 0,9 \times 892,646 \text{ kNmm}$$

$$= 803,292 \text{ kNmm}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya lentur *ultimate*.

$$M_u < \Phi M_n$$

32,55 kNmm < 803,292 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya lentur maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan lentur nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{M^u}{\Phi M_n} = 0,04$.

c. Perhitungan Komponen Struktur Geser

Komponen struktur geser harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab G SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×0,7 merupakan komponen struktur PSR persegi panjang, berbentuk boks, dan komponen struktur simetris ganda dan tunggal lain, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal G4 SNI 1729:2020.

$$\begin{aligned} \text{Kekuatan Geser Nominal } (V_n) &= 0,6 F_y A_w C_{v2} \\ &= 0,6 \times 210 \times 56 \times 1 \\ &= 7056 \text{ Nmm} \\ &= 7,056 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat Geser Desain } (\Phi V_n) &= 0,90 \times 7,056 \\ &= 6,3504 \text{ kNmm} \end{aligned}$$

Pemeriksaan kapasitas penampang pada profil *Hollow* 40×40×0,7 diperlukan untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban gaya geser *ultimate*.

$$V_u < \Phi V_n$$

0,119 kNmm < 6,3504 kNmm, maka **AMAN**

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya geser maksimum lebih kecil dibandingkan kekuatan geser nominal penampang. Dengan demikian, profil *Hollow*

40×40×0,7 dinyatakan aman terhadap gaya tekan yang bekerja, dengan rasio $\frac{V^u}{\Phi V_n} = 0,019$.

d. Interaksi Gaya Aksial dan Lentur

Komponen struktur yang menahan gaya aksial dan lentur harus direncanakan memenuhi ketentuan pada Bab H SNI 1729:2020. Adapun profil *Hollow* 40×40×0,7 merupakan komponen struktur simetris ganda yang menahan gaya lentur dan aksial, sehingga ketentuannya mengacu pada pasal H1.1 SNI 1729:2020.

$$\text{Kekuatan lentur perlu } (M_u) = 69,38 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan lentur tersedia } (\Phi M_n) = 803,292 \text{ kNmm}$$

$$\text{Kekuatan aksial perlu } (P_u) = 1,531 \text{ kN}$$

$$\text{Kekuatan aksial tersedia } (\Phi P_n) = 4,341 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio kekuatan aksial} &= \frac{P^u}{\Phi P_n} \\ &= \frac{1,531}{4,341} \\ &= 0,35 \geq 0,2 \end{aligned}$$

Karena rasio kekuatan aksial lebih besar dari 0,2, maka persamaan dan batasan yang digunakan untuk interaksi gaya aksial dan lentur adalah sebagai berikut.

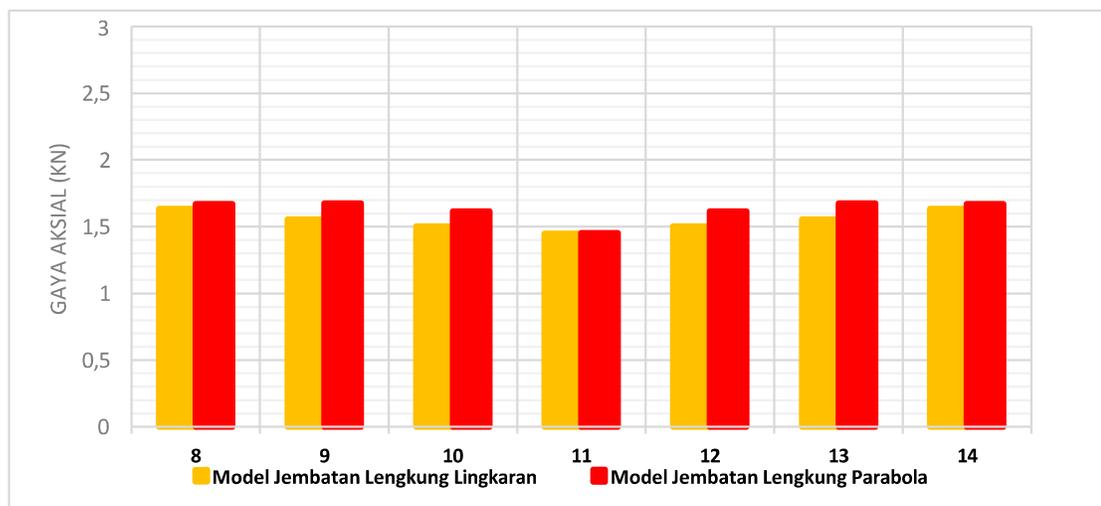
$$\begin{aligned} &= \frac{P_n}{\Phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \\ &= \frac{1,531}{4,341} + \frac{8}{9} \left(\frac{29,8}{1606,583} \right) \leq 1,0 \\ &= 0,389 \leq 1,0 \text{ OK} \end{aligned}$$

Nilai interaksi antara gaya aksial dan lentur diperoleh sebesar sama dengan atau kurang dari satu. Hasil ini menunjukkan bahwa penampang profil *Hollow* 40×40×0,7 tidak mengalami *overstress* dan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan gaya aksial serta momen yang bekerja. Dengan demikian, profil *Hollow* 40×40×0,7 dapat dinyatakan aman.

4.7 Perbandingan Respons Struktur Jembatan

Perbandingan respons struktur pelengkung utama (*arch rib*), kabel penggantung (*hanger*), dan gelagar memanjang (*stringer*) akan disajikan dalam bentuk grafik. Respons struktur jembatan mencakup gaya-gaya dalam maksimum, seperti gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur yang dihasilkan dari kombinasi beban pada pelengkung utama (*arch rib*), kabel penggantung (*hanger*), dan gelagar memanjang (*stringer*). Penyajian dalam bentuk grafik ini bertujuan untuk mempermudah pembacaan serta perbandingan hasil penelitian.

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

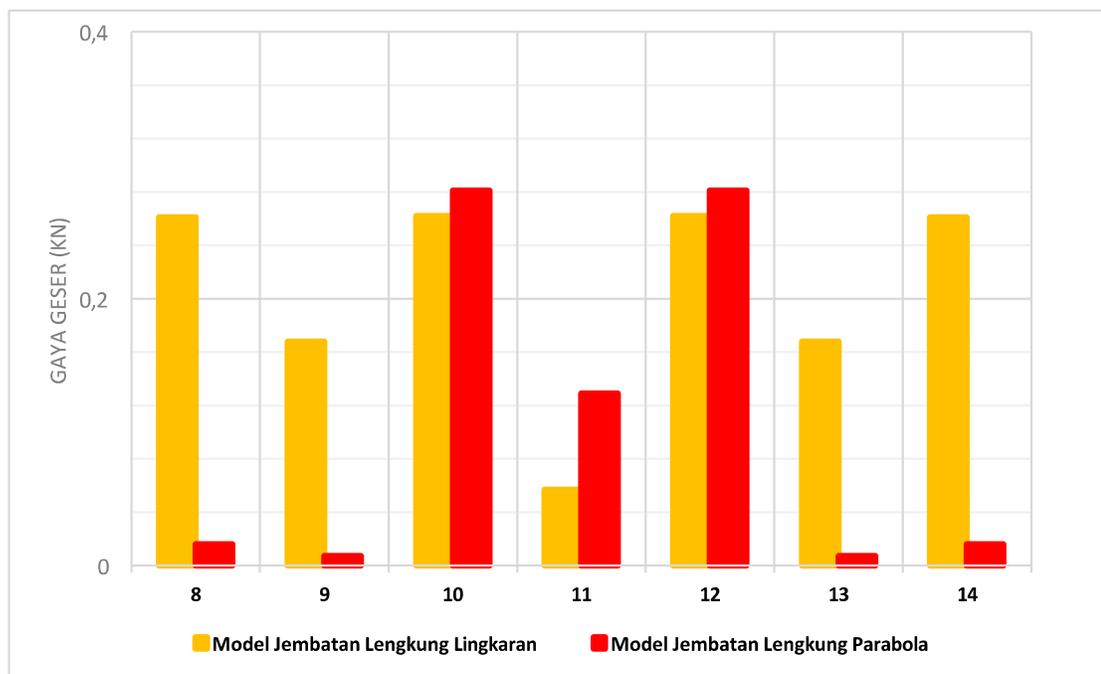


Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan gaya aksial pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada **Gambar 4. 22**. 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 4. 22** menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

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

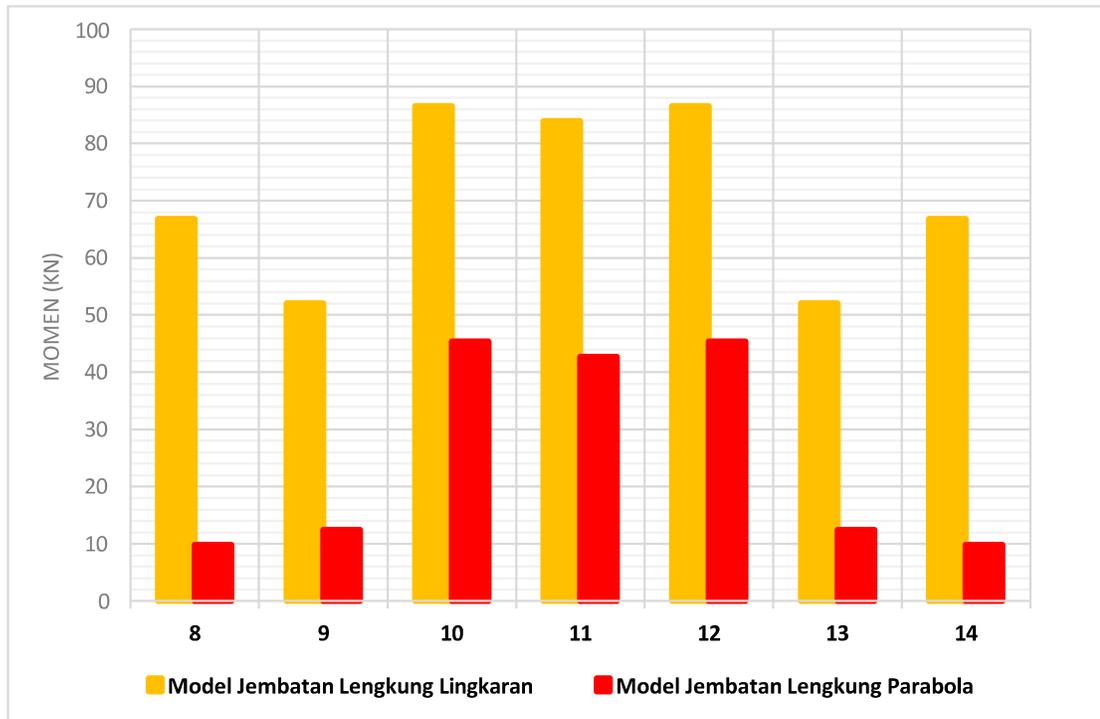


Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan Gaya Geser pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan gaya geser pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada **Gambar 4. 23**. 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 4. 23** menunjukkan bahwa gaya geser pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

4.7.3 Perbandingan Momen lentur pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

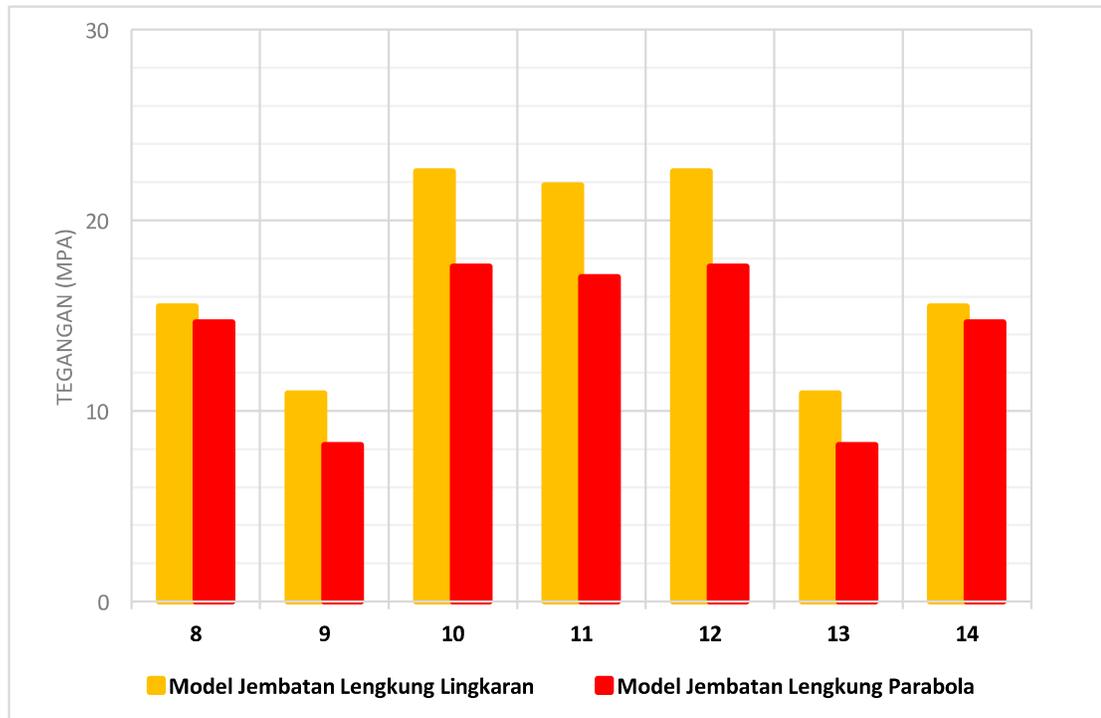


Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan Momen Lentur pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan momen lentur pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada **Gambar 4. 24**. 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 4. 24** menunjukkan bahwa momen lentur pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

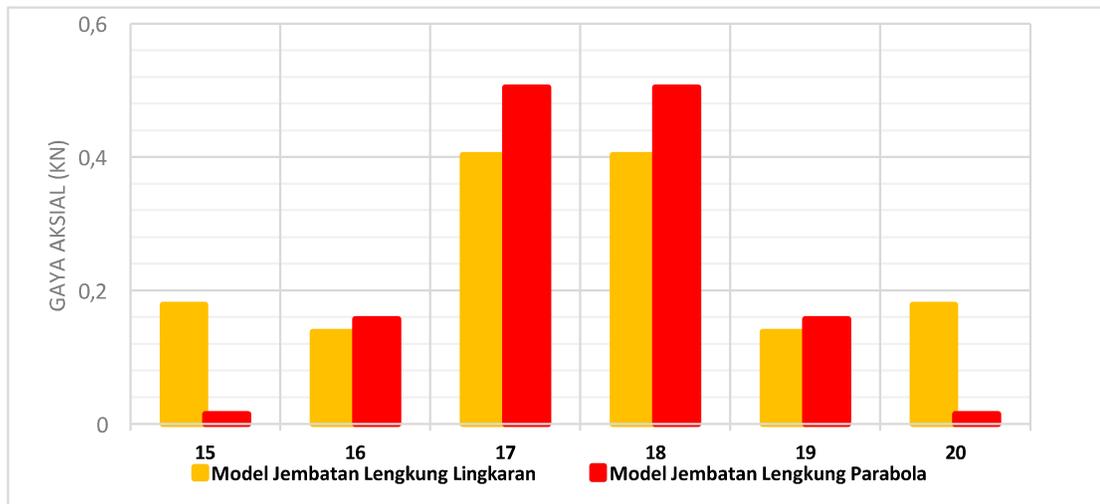
4.7.4 Perbandingan Tegangan pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)



Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Tegangan pada Pelengkung Utama (*Arch Rib*)

Perbandingan tegangan pada pelengkung utama (*arch rib*) ditampilkan pada **Gambar 4. 25**. 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 4. 25** menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

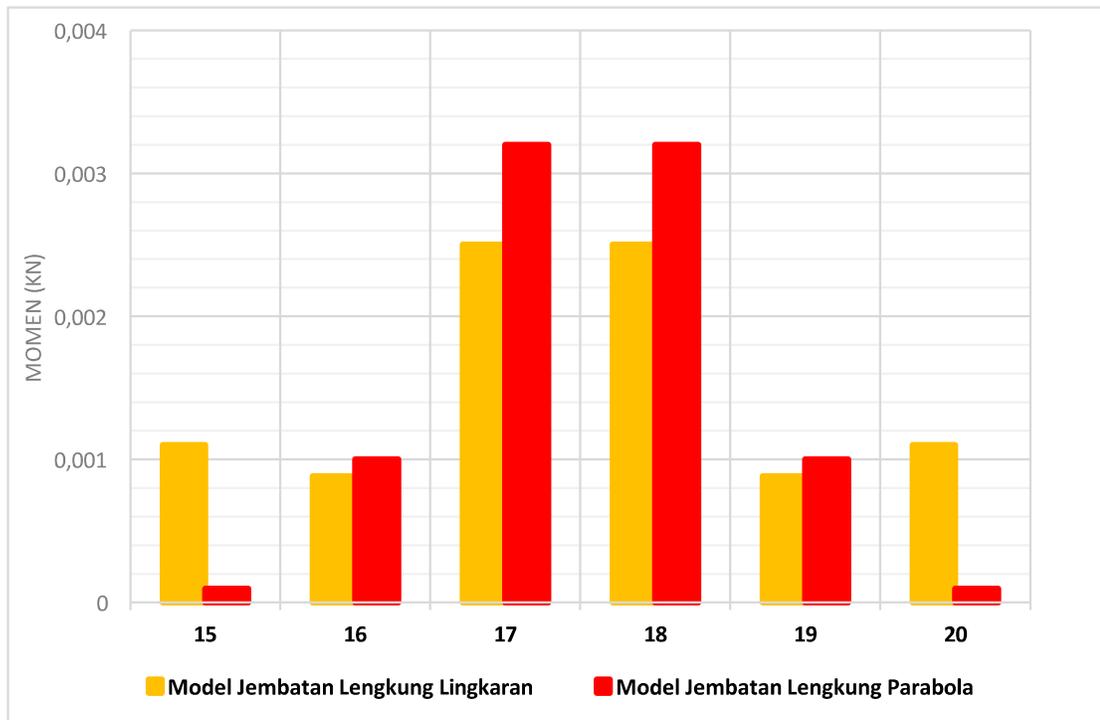
4.7.5 Perbandingan Gaya Aksial pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan gaya aksial pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada **Gambar 4. 26**. 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 4. 26** menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

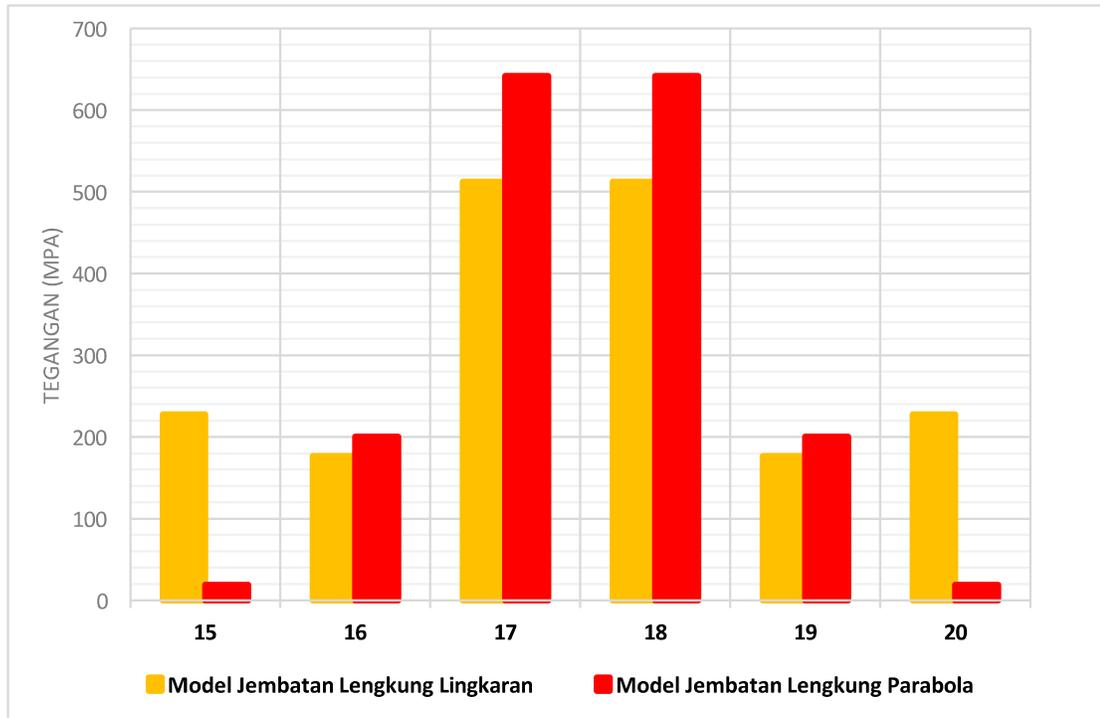
4.7.6 Perbandingan Regangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 4. 27 Grafik Perbandingan Regangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan regangan pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada **Gambar 4. 27**. 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 4. 27** menunjukkan bahwa regangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

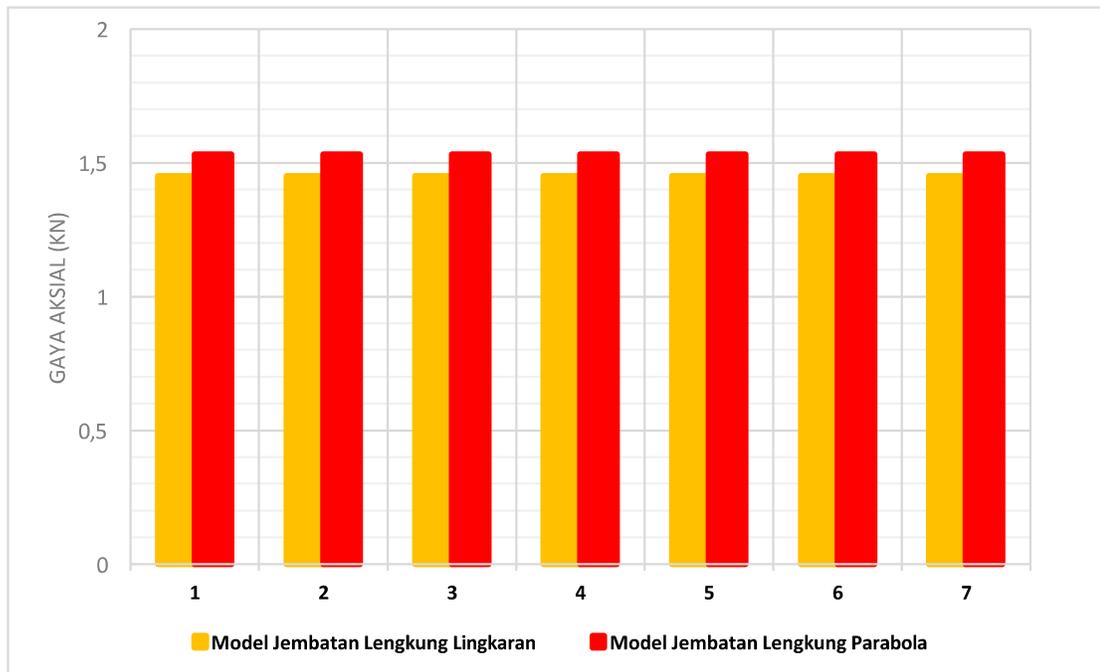
4.7.7 Perbandingan Tegangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)



Gambar 4. 28 Grafik Perbandingan Tegangan pada Kabel Penggantung (*Hanger*)

Perbandingan tegangan pada kabel penggantung (*hanger*) ditampilkan pada **Gambar 4. 28**. 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 4. 28** menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

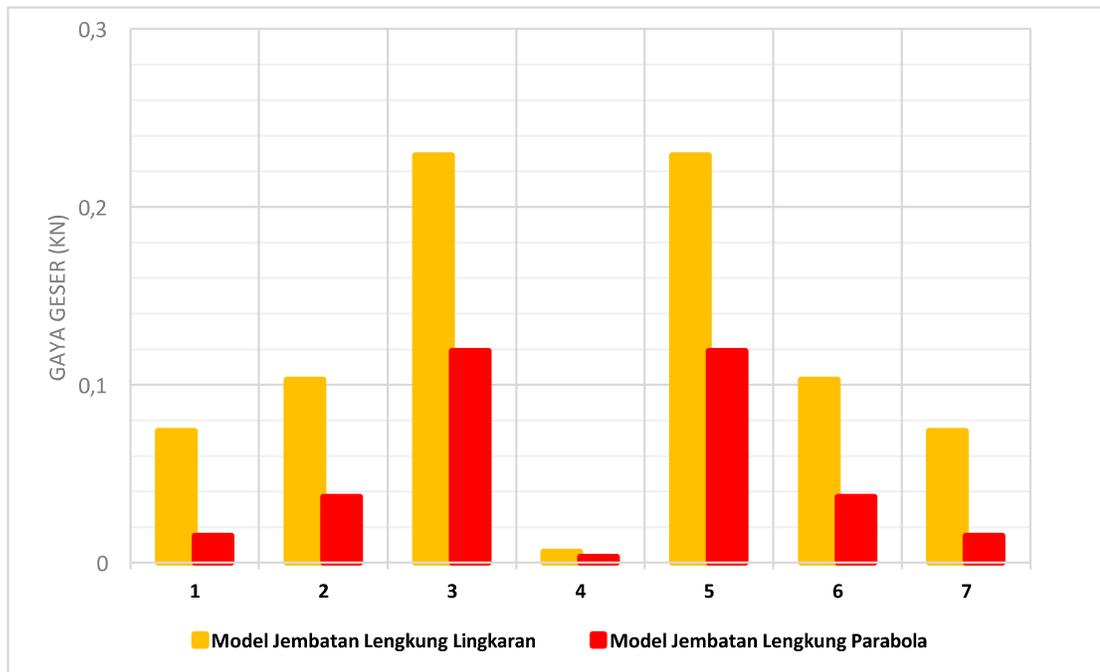
4.7.8 Perbandingan Gaya Aksial pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 29 Grafik Perbandingan Gaya Aksial pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan gaya aksial pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada **Gambar 4. 29**. 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 4. 29** menunjukkan bahwa gaya aksial pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

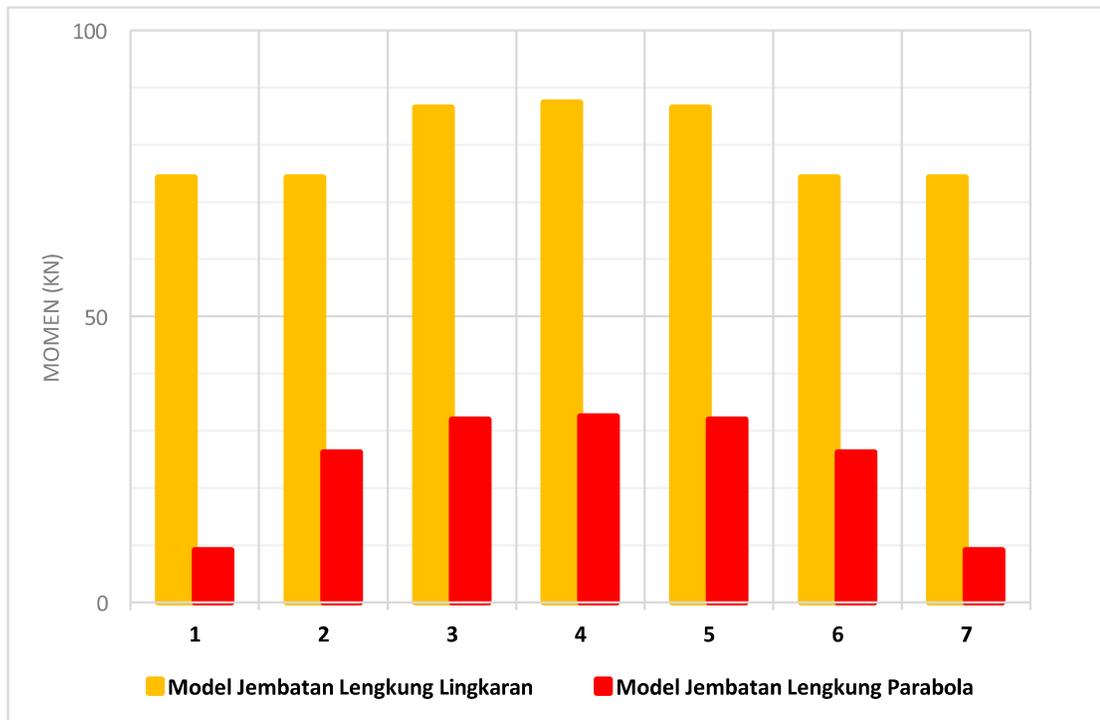
4.7.9 Perbandingan Gaya Geser pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan Gaya Geser pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan gaya geser pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada **Gambar 4. 30**. 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 4. 30** menunjukkan bahwa gaya geser pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

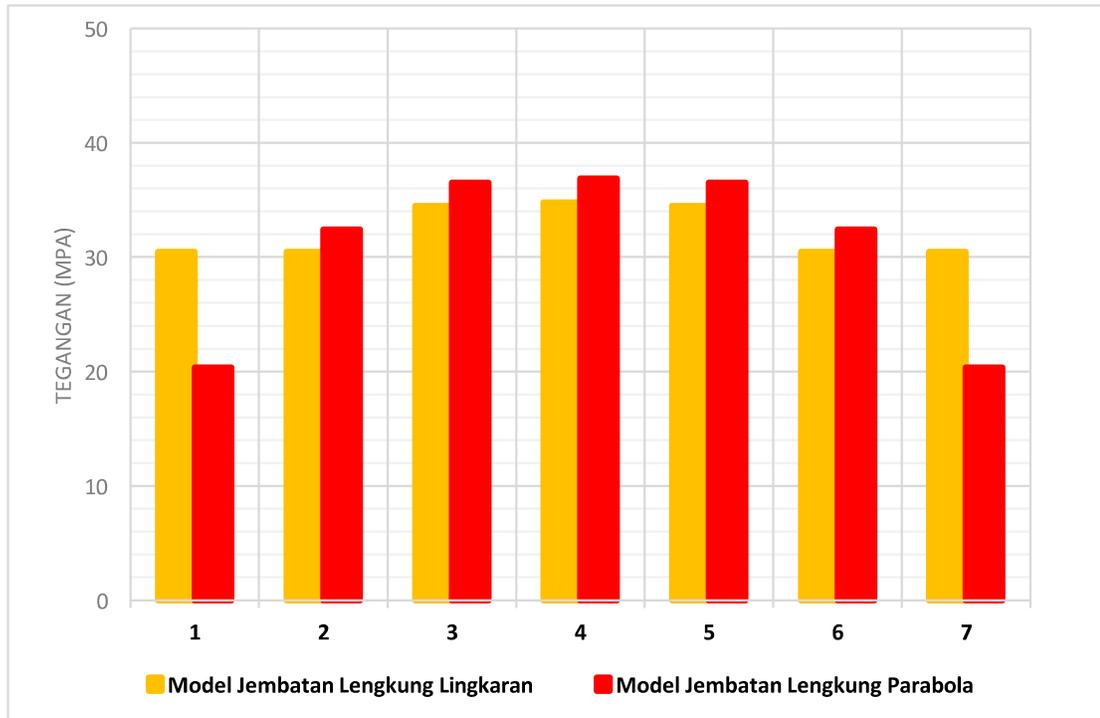
4.7.10 Perbandingan Momen lentur pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 31 Grafik Perbandingan Momen Lentur pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan momen lentur pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada **Gambar 4. 31**. 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 4. 31** menunjukkan bahwa momen lentur pada kedua model jembatan memiliki pola yang sama.

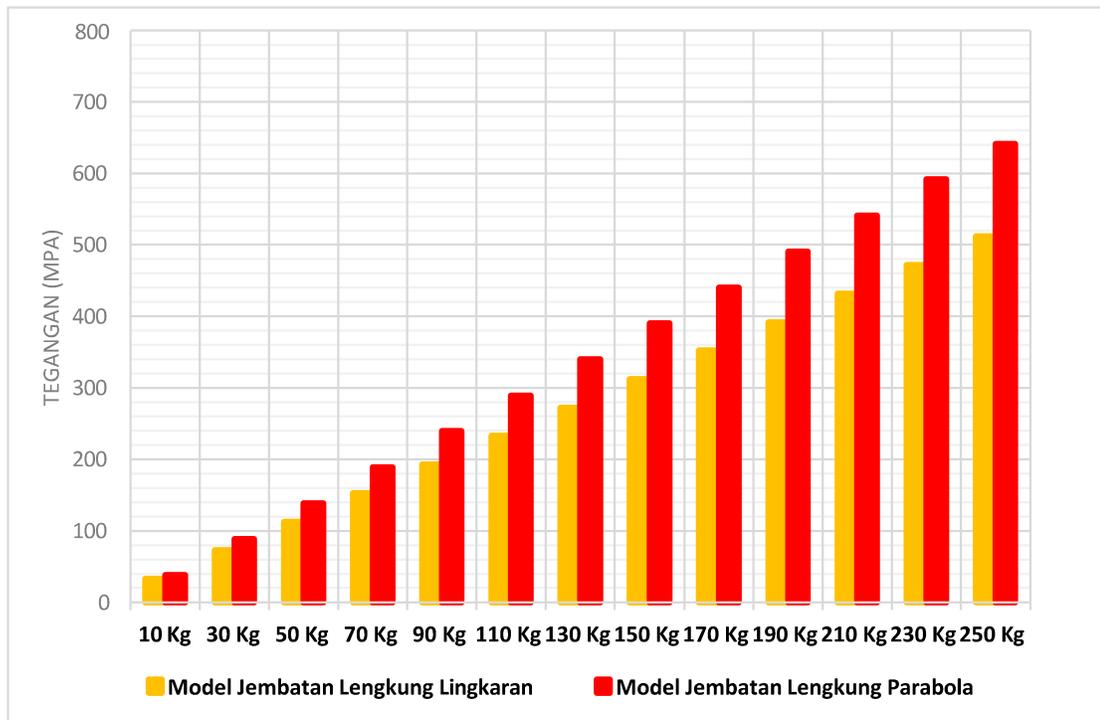
4.7.11 Perbandingan Tegangan pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)



Gambar 4. 32 Grafik Perbandingan Tegangan pada Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Perbandingan tegangan pada gelagar memanjang (*stringer*) ditampilkan pada **Gambar 4. 32**. 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 4. 32** menunjukkan bahwa tegangan pada kedua model jembatan memiliki pola yang berbeda.

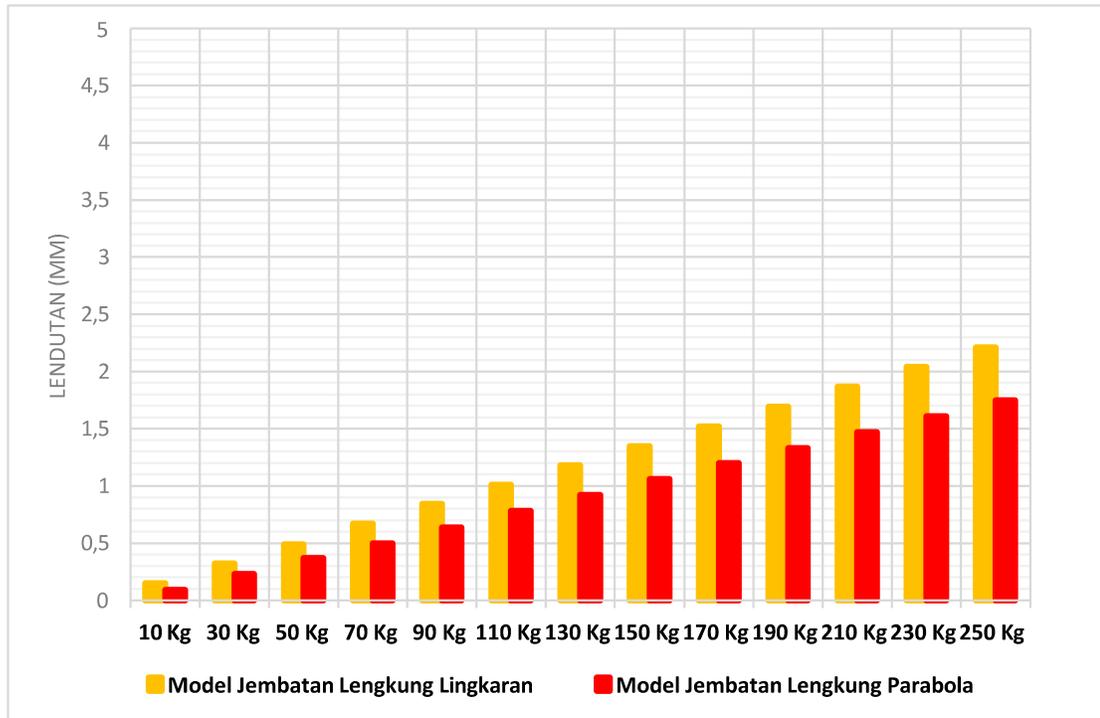
4.8 Perbandingan Tegangan Struktur Jembatan



Gambar 4. 33 Grafik *Step Loading* Tegangan pada Struktur Jembatan

Perbandingan *step loading* tegangan struktur jembatan dapat dilihat pada **Gambar 4. 33**. 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.

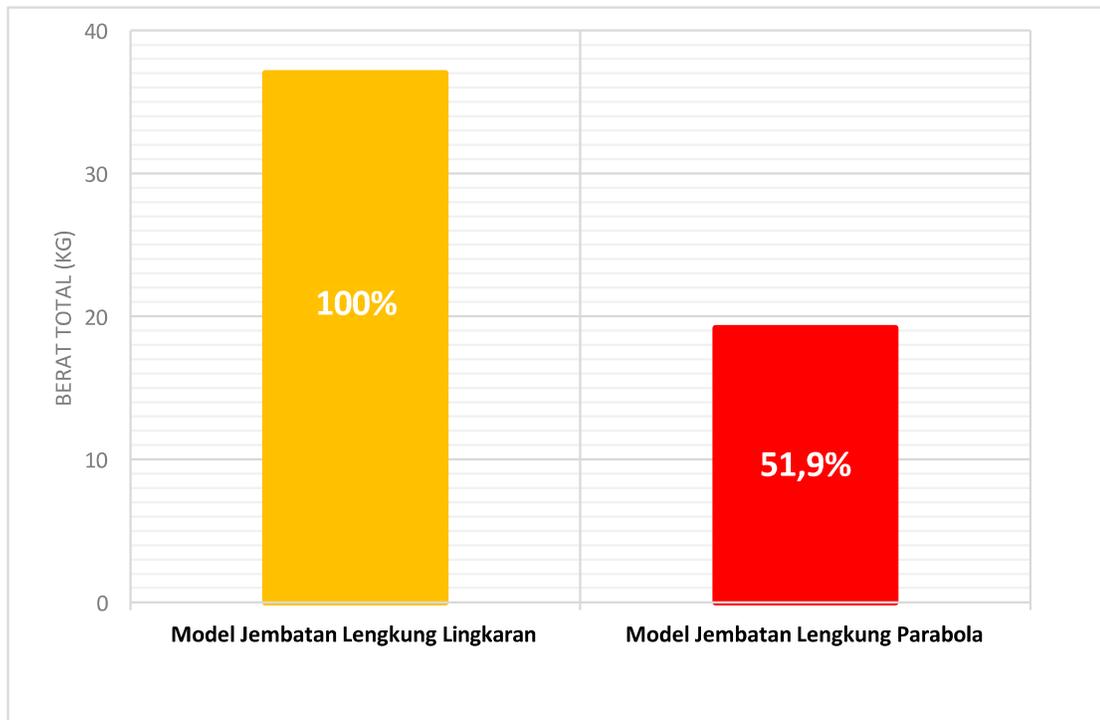
4.9 Perbandingan Lendutan Struktur Jembatan



Gambar 4. 34 Grafik Perbandingan Lendutan pada Struktur Jembatan

Perbandingan lendutan struktur jembatan dapat dilihat pada **Gambar 4. 34**. 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.

4.10 Perbandingan Efisiensi Material



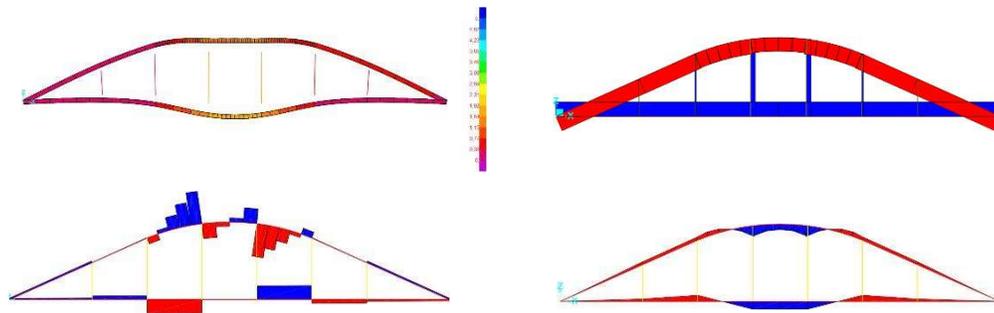
Gambar 4. 35 Grafik Perbandingan Efisiensi Material pada Struktur Jembatan

Secara teoritis, jembatan dengan lengkung parabola memiliki keunggulan dalam menyalurkan beban vertikal menjadi gaya tekan murni, sehingga momen lentur dapat diminimalkan. Hal ini menjadikannya lebih efisien dalam penggunaan material dan struktur saat beban terdistribusi secara merata. Sebaliknya, jembatan dengan lengkung lingkaran, meskipun unggul dalam aspek estetika dan kemudahan konstruksi, cenderung menghasilkan momen lentur yang lebih besar sehingga memerlukan penguatan tambahan. Bertambahnya lebar kurva lengkung dapat menambah berat struktur, material baja, serta biaya konstruksi jembatan. Kebutuhan material baja dalam penelitian ini didapatkan dari berat sendiri struktur pada *software* SAP2000 v.24. berikut adalah grafik perbandingan efisiensi material yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 35**.

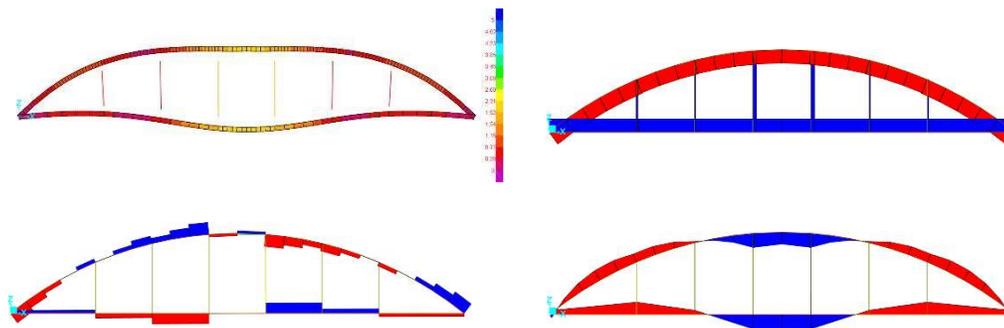
Berdasarkan **Gambar 4.35**, dapat dikatakan bahwa semakin lebar kurva pelengkung maka semakin besar pula penggunaan material baja pada struktur jembatan. begitupun sebaliknya, semakin kecil lebar kurva maka semakin kecil pula penggunaan material baja pada struktur jembatan. Pada **Gambar 4. 35** menunjukkan 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.

4.11 Interpretasi Hasil dengan Studi Pustaka



Model Jembatan Lengkung Parabola



Model Jembatan Lengkung Lingkaran

Gambar 4. 36 Interpretasi Hasil Pengujian pada Model Jembatan Lengkung Parabola dan Model Jembatan Lengkung Lingkaran

Hasil pengujian model jembatan pada studi ini menunjukkan bahwa model lengkung parabola mampu menahan beban lebih tinggi dan mengalami lendutan lebih kecil dibandingkan model lengkung lingkaran. Temuan ini selaras dengan analisis numerik Ramachandran et al. (2018) yang melaporkan momen lentur dan tegangan gabungan pada lengkung parabola lebih rendah daripada lengkung lingkaran dalam kondisi beban seragam. Selain itu, Ramachandran et al. (2018) juga menemukan bahwa lengkung parabola cenderung menghasilkan lendutan total yang lebih kecil dibanding lengkung lingkaran di bawah beban vertikal dominan. Gambaran ini konsisten dengan pengujian pada skripsi, di mana distribusi gaya tekan pada lengkung parabola mendekati garis funikular beban sehingga deformasi strukturnya lebih kecil. Sebaliknya lengkung lingkaran menunjukkan deformasi (defleksi) lebih besar karena adanya momen lentur yang tidak muncul pada lengkung parabola.

Dari aspek kestabilan struktur, literatur juga mengkonfirmasi keunggulan lengkung parabola. Austin dan Ross (1976) melaporkan bahwa untuk rasio span-tinggi antara 2 hingga 5, lengkung parabola dapat memikul beban kritis *buckling* 10-48% lebih besar dibanding lengkung lingkaran. Hal ini menandakan bahwa lengkung parabola memiliki resistensi instabilitas (*buckling*) lebih tinggi. Dalam pengujian model jembatan, kondisi ini teramati sebagai model lengkung parabola yang lebih tahan terhadap gejala keruntuhan lateral, memungkinkan mencapai beban keruntuhan lebih tinggi daripada model lengkung lingkaran. Dengan demikian, keefisiensannya dalam mendistribusikan gaya tekan secara optimal juga meningkatkan faktor keamanan terhadap pembengkokan kritis. Dan juga Paransa, F. A. J. (2020) melaporkan bahwa secara garis besar, gaya-gaya dalam yang terjadi pada struktur rangka utama pelengkung menurun seiring bertambahnya tinggi busur jembatan.

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.