

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Penggunaan studi literatur terdahulu yang digunakan sebagai referensi dan perbandingan akan mempermudah penyusun dalam mengerjakan tugas akhir ini. Setiap studi terdahulu akan dilakukan *review* untuk menyampaikan isi dari jurnal atau Pustaka lainnya secara ringkas. Beberapa studi literatur yang relevan dengan topik “Studi Perbandingan Variasi Bentuk Lengkung terhadap Stabilitas Jembatan Pelengkung” yang dapat dilihat pada **Tabel 2. 1**.

Tabel 2. 1 Studi Literatur

<i>Review <u>Literatur 1</u></i>	
Judul	Studi Perbandingan Pengaruh Variasi Tinggi Lengkung terhadap Panjang Bentang 120 Meter pada Jembatan Rangka Tipe Menerus: Studi Kasus Jembatan Dian Pulau–Tetoat
Tahun	2020
Penyusun	Fildzah Adhania Johanes Paransa
Hasil	Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tinggi lengkung pada jembatan rangka baja tipe menerus dengan panjang bentang 120 meter. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan tinggi lengkung mengurangi respons struktur seperti gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur, namun meningkatkan kebutuhan material baja. Rasio panjang bentang terhadap tinggi lengkung yang efisien adalah sekitar 6:1.
<i>Review <u>Literatur 2</u></i>	
Judul	Analisis Optimalisasi Tinggi Fokus (f) Pelengkung pada Perencanaan Jembatan Lengkung Tipe Lantai Atas (<i>Arch Bridge Deck Type</i>)

Tahun	2018
Penyusun	Moch. Zaini, Suprpto
Hasil	Studi ini membahas pengaruh variasi tinggi fokus pelengkung terhadap kekuatan pilar pada jembatan lengkung beton. Dengan memodelkan tiga variasi tinggi fokus (10 m hingga 12 m), ditemukan bahwa tinggi fokus 12 m atau 1/5 dari panjang bentang memberikan hasil optimal dalam hal aksial dan momen pada pilar.
<i>Review <u>Literatur 3</u></i>	
Judul	Optimasi Geometri Berdasarakan Gaya-Gaya Dalam Pada Jembatan Pelengkung Beton
Tahun	2018
Penyusun	Almulianur, Akhmad Aminullah, Muslikh
Hasil	Penelitian ini berfokus pada optimasi geometri jembatan pelengkung beton dengan menganalisis rasio antara tinggi pelengkung terhadap panjang pelengkung. Studi ini memodelkan jembatan dengan bentang 150 meter menggunakan <i>software</i> SAP2000, dengan variasi rasio dari 1:2 hingga 1:8 dalam interval 0,25. Hasil analisis menunjukkan bahwa geometri yang paling optimal, berdasarkan gaya-gaya dalam yang terjadi, berada pada rasio antara 1:4 hingga 1:7,25.
<i>Review <u>Literatur 4</u></i>	
Judul	Studi Perbandingan Tinggi Busur Terhadap Bentang Utama Pada Jembatan Busur Rangka Baja Tipe <i>A Half-Through Arch Bridge</i>
Tahun	2017
Penyusun	Fitri Maisyarah
Hasil	Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tinggi lengkung jembatan rangka baja terhadap respon struktur jembatan yang dapat mempengaruhi nilai kebutuhan material. Analisis pada jembatan

	tersebut menggunakan <i>software</i> SAP2000 v.14 dengan 2 variasi model jembatan yang memiliki tinggi 40,57 meter (model jembatan 1) dan 52 meter (model jembatan 2).
<i>Review Literatur 5</i>	
Judul	Pengaruh Rasio Bentang dan Tinggi Jembatan Pelengkung Beton Bertulang untuk Jalan Rel Terhadap Gaya-Gaya Dalam
Tahun	2017
Penyusun	Rani Retnoningtyas
Hasil	Penelitian ini membahas rasio optimal antara panjang bentang (L) dan tinggi lengkung (f) pada jembatan jalan rel (<i>span to rise ratio</i>). Analisis dalam penelitian ini mempertimbangkan perbandingan panjang bentang dan tinggi lengkung jembatan dengan meninjau faktor kekuatan serta stabilitas struktur.

Berdasarkan hasil resume yang telah dikaji, dapat disimpulkan bahwa variasi bentuk geometri dan parameter lengkung, seperti tinggi fokus lengkung, memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas, kekuatan, dan efisiensi struktur jembatan pelengkung. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tinggi fokus lengkung dapat mengurangi gaya aksial, gaya geser, momen lentur, serta deformasi, tetapi meningkatkan kebutuhan material. Selain itu, variasi bentuk lengkung juga memengaruhi respons dinamis jembatan terhadap beban gempa, di mana stabilitas dan performa struktur bergantung pada desain yang optimal. Secara keseluruhan, pemilihan bentuk lengkung dan parameter desain yang tepat sangat penting untuk meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan keberlanjutan jembatan pelengkung, baik pada material baja maupun beton.

2.2 Tinjauan Umum

Jembatan dapat didefinisikan sebagai suatu struktur yang berfungsi untuk menghubungkan jalur atau lintasan transportasi yang terputus oleh hambatan, seperti sungai, jurang, jalan raya, selat, rel kereta api, atau rintangan lainnya. Jika diklasifikasikan berdasarkan sistem strukturnya, jembatan memiliki berbagai jenis yaitu:

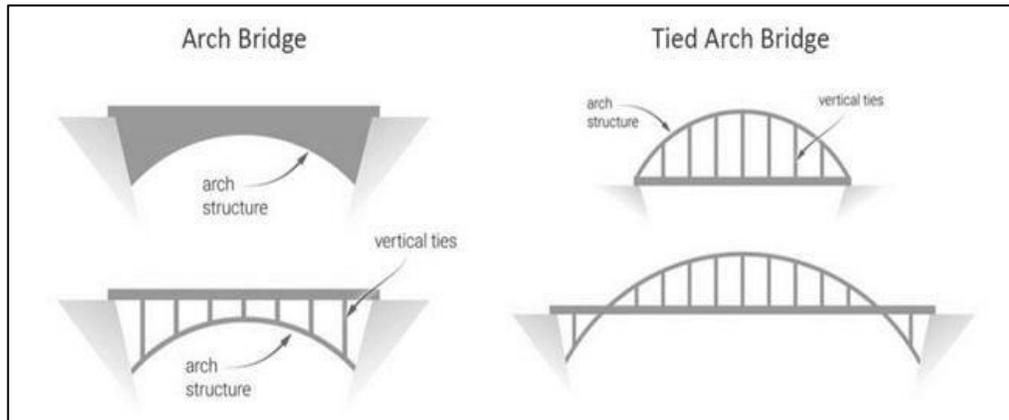
1. Jembatan Pelengkung (*Arch Bridge*)
2. Jembatan Gelagar (*Beam Girder*)
3. Jembatan Gantung (*Suspension Bridge*)
4. Jembatan Rangka (*Truss Bridge*)
5. Jembatan Kabel-Penahan (*Cable-Stayed Bridge*)
6. Jembatan Kantilever (*Cantilever Bridge*)

2.3 Definisi Jembatan Pelengkung

2.3.1 Jembatan Tipe Pelengkung Terikat (*Tied Arch Bridge*)

Jembatan pelengkung merupakan struktur jembatan setengah lingkaran dengan abutmen di kedua sisinya yang memiliki stabilitas struktur dan kapasitas beban yang tinggi. Struktur pelengkung akan mengalihkan beban yang diterima lantai kendaraan jembatan menuju ke abutmen yang menjaga kedua sisi jembatan, Ketika menahan beban akibat berat sendiri dan beban lalu lintas, dimana setiap pelengkung menerima gaya tekan.

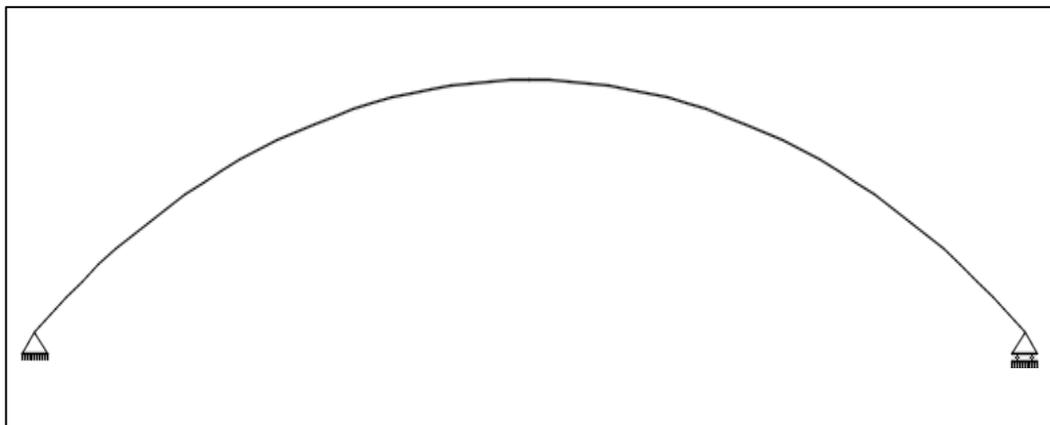
Jembatan pelengkung terikat memiliki kemampuan untuk menahan beban besar sehingga cocok untuk bentang yang Panjang. Berat material yang relatif ringan serta perakitannya dapat dilakukan per bagian atau segmen menjadikan model pelengkung banyak digunakan sebagai struktur jembatan, bebarapa diantaranya dapat dilihat pada **Gambar 2. 1.**



Gambar 2. 1 Tipe Jembatan Pelengkung

2.3.2 Bentuk Lengkung Lingkaran

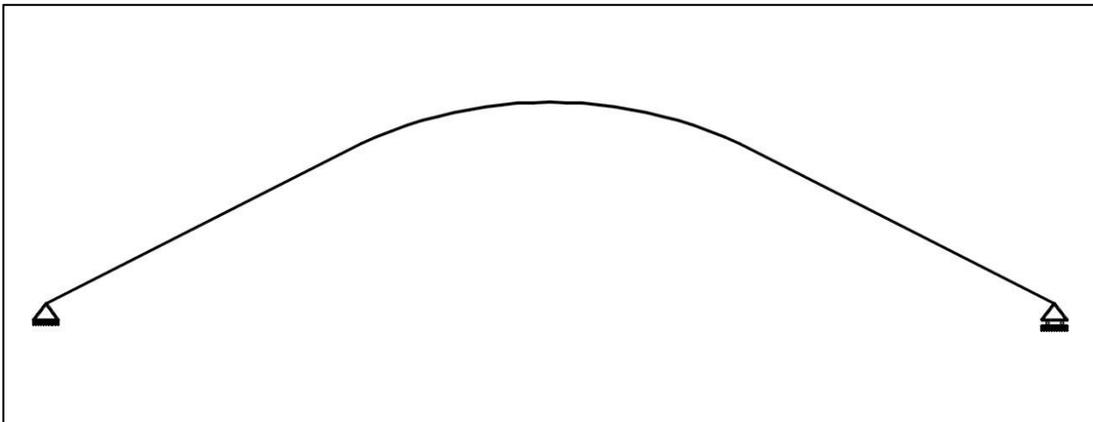
Lengkung lingkaran memiliki radius konstan, membentuk setengah lingkaran sempurna dengan persamaan umum $((x-a)^2+(y-b)^2=r^2)$ atau pada penelitian ini $x^2+y^2-4000x-1400y+490000=0$ dengan jari-jari $r=2000$. Desain ini lebih mudah dihitung dan dikonstruksi karena geometrinya yang simetris dan seragam. Gaya tekan terdistribusi merata sepanjang lengkung, cocok untuk beban statis atau beban mati yang homogen. Namun, pada beban dinamis, lengkung lingkaran cenderung menghasilkan momen lentur yang lebih besar karena kurvatur tetap. Jembatan pelengkung dengan bentuk lengkung lingkaran dapat dilihat pada **Gambar 2. 2**.



Gambar 2. 2 Jembatan Pelengkung dengan Bentuk Lengkung Lingkaran

2.3.3 Bentuk Lengkung Parabola

Lengkung parabola menyerupai kurva matematis dan gradien yang semakin landai ke arah abutmennya dengan persamaan umum ($y=ax^2+bx+c$) atau pada penelitian ini $y=2000x^2+700x-2000$ dengan $a=2000/ a>0$ (parabola terbuka keatas). Bentuk ini memerlukan perhitungan lebih detail untuk memastikan garis tekan (*compression line*) sejalan dengan sumbu lengkung. Pada distribusi beban, kurva parabola menyesuaikan garis aliran gaya tekan alami dari beban terdistribusi seragam (seperti beban mati dan hidup), sehingga mengurangi momen lentur dan memaksimalkan efisiensi material. Jembatan pelengkung dengan bentuk lengkung parabola dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.

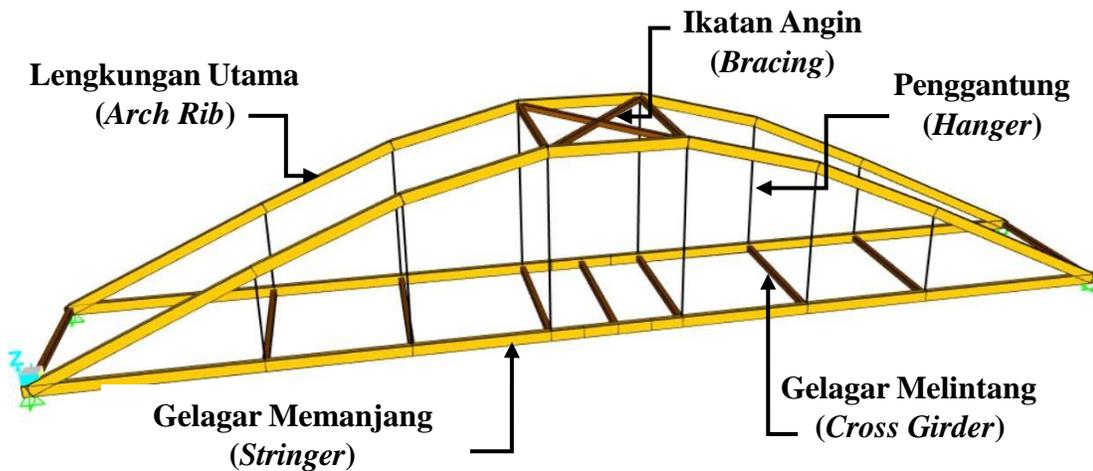


Gambar 2.3 Jembatan Pelengkung dengan Bentuk Lengkung Parabola

2.4 Struktur Jembatan

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

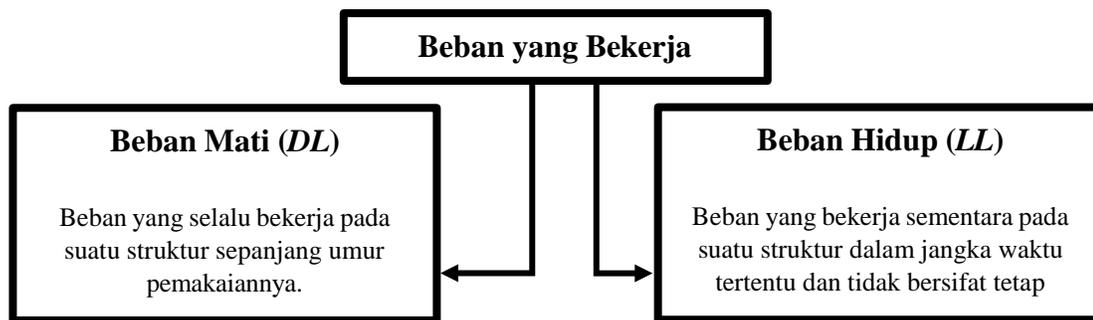
yang mentransfer beban ke gelagar memanjang (*stringer*) yang langsung terhubung pada pondasi atau abutmen dibawah jembatan.



Gambar 2. 4 Komponen Struktur Jembatan

2.5 Pembebanan Struktur Jembatan

Dalam perancangan jembatan, aspek keamanan, keselamatan, dan kenyamanan pengguna harus menjadi perhatian utama. Keamanan jembatan merupakan faktor paling penting dalam proses perancangan, sehingga jembatan harus dirancang agar mampu menahan berbagai beban yang bekerja padanya. Skema pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2. 5**.



Gambar 2. 5 Skema Pembebanan

2.5.1 Beban Mati (*DL – Dead Load*)

Beban mati jembatan adalah beban yang selalu ada pada sebuah struktur selama masa pemakaiannya dan tidak berubah seiring waktu. Secara khusus pada jembatan, beban mati mencakup berat sendiri struktur seperti gelagar, dek, sambungan, dan elemen pendukung lainnya. Dalam penelitian ini, beban mati mencakup berat sendiri dari struktur jembatan.

2.5.2 Beban Hidup (*LL – Live Load*)

Beban Hidup adalah beban yang bekerja pada struktur dalam jangka waktu tertentu dan tidak bersifat tetap. Beban ini bersifat sementara dan dapat berubah-ubah seiring waktu. Beban hidup pada penelitian ini terdiri dari beban pelat baja seberat 250 kg sesuai pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024.

2.6 Kombinasi Pembebanan

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

Keadaan batas kekuatan diterapkan untuk memastikan bahwa jembatan memiliki kekuatan dan stabilitas yang memadai dalam menahan berbagai kombinasi beban selama masa layan. Kombinasi pembebanan serta nilai faktor beban yang digunakan mengacu pada Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 dapat dilihat pada **Tabel 2. 2**.

Tabel 2. 2 Kombinasi Pembebanan dan Nilai Faktor Beban

Kelompok Pembebanan		Faktor Beban
Beban Mati	<i>DL</i>	1,10
Beban Hidup	<i>LL</i>	1,00

2.7 Perencanaan Struktur Jembatan

Penelitian ini mengkaji struktur jembatan tipe pelengkung terikat (*tied arch bridge*) berdasarkan Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024. Analisis dilakukan menggunakan bantuan *software* SAP2000. Selain itu, perhitungan manual dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas penampang sesuai dengan SNI 1729:2020 (Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural) guna memverifikasi hasil desain dan analisis. Perencanaan struktur jembatan ini mencakup elemen-elemen seperti penggantung (*hanger*), gelagar melintang (*cross girder*), lengkungan utama (*arch rib*), gelagar memanjang (*stringer*), dan pelat lantai (*deck*).

2.7.1 Pemodelan dan Analisis Struktur

Pemodelan dan analisis struktur dilakukan menggunakan *software* SAP2000 v.24, yang menghasilkan data berupa gaya-gaya dalam, tegangan, regangan dan lendutan. Struktur dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi (3D), dengan bidang gambar berada pada sumbu global x dan y.

2.7.2 Perhitungan Kapasitas Penampang

Setelah proses desain dan analisis menggunakan SAP2000, kapasitas penampang jembatan dievaluasi melalui perhitungan manual berdasarkan ketentuan Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBT) sesuai dengan SNI 1729:2020. Perencanaan harus memenuhi persyaratan bahwa kekuatan desain setiap komponen struktural harus sama

atau lebih besar dari kekuatan yang dibutuhkan berdasarkan kombinasi beban. Desain dilakukan dengan mengikuti persamaan berikut..

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.1)$$

dengan:

R_u = kekuatan perlu menggunakan kombinasi beban DFBT

R_n = kekuatan nominal

ϕ = faktor ketahanan

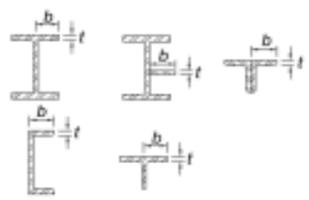
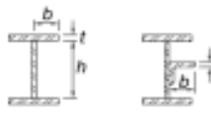
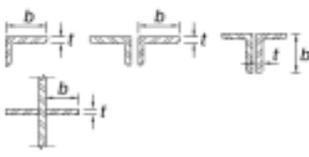
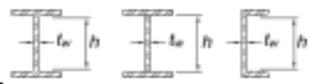
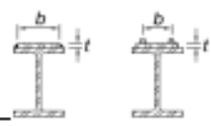
ϕR_n = kekuatan desain

2.7.2.1 Klasifikasi Penampang

Komponen struktur yang mengalami tekan aksial diklasifikasikan sebagai penampang dengan elemen non-langsing atau elemen langsing. Pada penampang dengan elemen non-langsing, rasio lebar terhadap tebal elemen tekan tidak boleh melebihi nilai batas (λr) yang tercantum dalam **Tabel 2.3**. Jika salah satu atau lebih elemen tekan memiliki rasio lebar terhadap tebal yang melampaui nilai (λr), maka penampang tersebut dikategorikan sebagai penampang dengan elemen langsing.

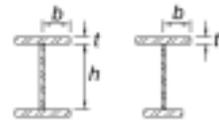
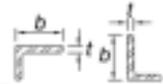
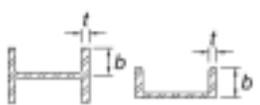
Komponen struktur yang mengalami lentur diklasifikasikan menjadi penampang dengan elemen kompak, non-kompak, atau langsing. Pada penampang kompak, sayap harus terhubung dengan badan atau beberapa badan, serta rasio lebar terhadap tebal setiap elemen tekan tidak boleh melebihi batas (λp) yang tercantum dalam **Tabel 2.5**. Jika rasio lebar terhadap tebal satu atau lebih elemen tekan melebihi (λp) tetapi masih dalam batas (λr) dari **Tabel 2.5**, maka penampang dikategorikan sebagai non-kompak. Namun, jika rasio tersebut melampaui (λr), maka penampang tersebut termasuk dalam kategori elemen langsing.

Tabel 2. 3 Rasio Lebar terhadap Tebal: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Aksial Tekan

	Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batas Rasio Lebar terhadap Tebal, λ_t (nonlangsing / langsing)	Contoh
Elemen tidak diperkaku	1	Sayap Profil I gilas panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I gilas panas, kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap kanal, dan sayap T	b/t	$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Sayap profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	b/t	$0,64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	3	Kaki siku tunggal, kaki siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tidak diperkaku lainnya	b/t	$0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	Badan T	d/t	$0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Elemen diperkaku	5	Badan profil I simetris ganda dan penampang profil I tersusun dan kanal	h/t_w	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Dinding PSR persegi panjang	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara baris-baris pengencang atau las	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Semua elemen diperkaku lainnya	b/t	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	PSR bulat	D/t	$0,11 \frac{E}{F_y}$	
<p>[a] $k_c = 4\sqrt{h/t_w}$, tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,35 atau lebih besar dari 0,76 dalam perhitungan.</p>					

Sumber: Tabel B4.1a SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (2020)

Tabel 2. 4 Rasio Lebar terhadap Tebal: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Lentur

	Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batas Rasio Lebar terhadap Tebal		Contoh
				λ_p (kompak/ (nonkompak)	λ_r (nonkompak/ langsing)	
Elemen tidak diperkaku	10	Sayap profil I gelas panas, kanal, dan T	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Sayap profil tersusun bentuk I simetris ganda dan tunggal	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\begin{matrix} (a) & (b) \\ 0,95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_c L}} \end{matrix}$	
	12	Kaki siku tunggal	b/t	$0,54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Sayap semua profil I dan kanal yang mengalami lentur terhadap sumbu lemah	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Badan T	d/t	$0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Sumber: Tabel B4.1b SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (2020)

Tabel 2. 5 (lanjutan) Rasio Lebar terhadap Tebal: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Lentur

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batas Rasio Lebar terhadap Tebal		Contoh	
			λ_p (kompak/ nonkompak)	λ_r (nonkompak/ langsing)		
Elemen tidak diperkaku	15	Badan profil simetris ganda dan kanal	h/t_w	$3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Badan profil simetris tunggal	h_c/t_w	$\frac{\lambda_c \sqrt{\frac{E}{F_y}} [c]}{(0,54 \frac{M_y}{M_x} - 0,09)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Sayap PSR persegi panjang	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara baris-baris pengencang atau las	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Badan PSR persegi panjang dan boks	h/t	$2,42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
20	PSR bundar	D/t	$0,07 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,31 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$		
21	Sayap penampang boks	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$		
<p>(i) $k_c = 4\sqrt{h/t_w}$ tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,35 maupun lebih besar dari 0,76 dalam perhitungan.</p> <p>(ii) $F_L = 0,7F_y$ untuk komponen struktur profil I badan langsing dan lentur sumbu mayor pada komponen struktur profil I tersusun dengan badan kompak dan nonkompak dan $S_{xx}/S_{yy} \geq 0,7$; $F_L = F_y S_{xx}/S_{yy} \geq 0,5F_y$ untuk lentur sumbu mayor pada komponen struktur profil I tersusun dengan badan kompak dan nonkompak dan $S_{xx}/S_{yy} < 0,7$; S_{xx}, S_{yy} = modulus penampang elastis dimaksudkan untuk sayap tarik dan tekan, in.³ (mm³).</p>						
<p>(iii) M_y = momen pada saat serat terluar leleh. $M_p = F_y Z_x$, momen lentur plastis, kip-in. (N-mm), dengan Z_x = modulus penampang plastis terhadap sumbu x, in.³ (mm³). E = modulus elastisitas baja = 29.000 ksi (200.000 MPa) SNE = sumbu netral elastis F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi, ksi (MPa) SNP = sumbu netral plastis F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi, ksi (MPa)</p>						

Sumber: Tabel B4.1b SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (2020)

2.7.2.2 Komponen Struktur Tarik

Menurut SNI 1729:2020, kekuatan tarik desain (ϕP_n) harus diambil nilai terendah berdasarkan keadaan batas di bawah ini.

- a. Untuk leleh tarik pada penampang bruto, dengan faktor reduksi $\phi_t = 0,90$:

$$P_n = f_y A_g \quad (2.2)$$

- b. Untuk keruntuhan tarik pada penampang neto, faktor reduksi $\phi_t = 0,75$:

$$P_n = f_u A_e \quad (2.3)$$

dengan:

A_g = luas bruto penampang dari komponen struktur (mm^2)

A_e = luas neto efektif (mm^2)

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi (MPa)

F_u = kekuatan tarik minimum terspesifikasi (MPa)

2.7.2.3 Komponen Struktur Tekan

Menurut Dewobroto (2016), kestabilan dalam perencanaan komponen struktur tekan harus diperhatikan karena adanya risiko tekuk (*buckling*) pada elemen tekan yang langsing. Pada jembatan rangka, komponen struktur tekan umumnya ditemukan pada bagian kolom, yang dapat berupa profil tunggal atau profil tersusun yang disambung menggunakan pelat kopel.

Kekuatan tekan desain ($\phi_c P_n$) dihitung berdasarkan kekuatan tekan nominal (P_n) terendah yang diperoleh dari kondisi batas tekuk lentur dan tekuk torsi. Faktor ketahanan untuk tekan (ϕ_c) yang digunakan adalah 0,90. Persamaan untuk menentukan kekuatan tekan nominal adalah sebagai berikut.

$$P_n = F_{cr} \times A_g \quad (2.4)$$

dengan:

P_n = kekuatan tekan nominal (kN)

F_{cr} = tegangan kritis (MPa)

A_g = luas bruto penampang dari komponen struktur (mm^2)

Adapun pemilihan untuk penerapan profil komponen struktur tekan mengacu pada **Tabel 2. 5.**

Tabel 2. 5 Pemilihan untuk Penerapan Profil Komponen Struktur Tekan

Penampang Melintang	Tanpa Elemen Langsing		Dengan Elemen Langsing	
	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas
	E3 E4	FB TB	E7	LB FB TB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E6 E3 E4	FB FTB	E6 E7	LB FB FTB
	E5		E5	
	E3	FB	N/A	N/A
Bentuk asimetris selain siku tunggal	E4	FTB	E7	LB FTB

FB = tekuk lentur, TB = tekuk torsi, FTB = tekuk torsilentur, LB = tekuk lokal, N/A = tidak dapat diterapkan

Sumber: Tabel E1.1 SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (2020)

a. Panjang Efektif

Menurut SNI 1729:2020, faktor panjang efektif (K) untuk semua komponen struktur dalam perhitungan kelangsingan harus diambil sebesar 1,0. Selain itu, untuk komponen struktur yang dirancang menahan tekan, rasio kelangsingan efektif (KL/r) sebaiknya tidak melebihi 200.

$$\frac{KL}{r} < 200 \quad (2.5)$$

dengan:

K = faktor panjang efektif

L = panjang batang (mm)

r = radius girasi (mm)

b. Tekuk Lentur Pada Komponen Struktur Tanpa Elemen Langsing

Tekuk lentur dipengaruhi oleh kelangsingan efektif elemen, dengan kekuatan tekan ditentukan oleh tegangan kritis (F_{cr}) penampang. Nilai tegangan kritis ini diperoleh berdasarkan teori tekuk Euler. Tekuk terjadi pada sumbu penampang dengan kelangsingan terbesar, yaitu sumbu dengan momen inersia atau jari-jari girasi terkecil. Tegangan kritis dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$1) \text{ Bila } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ (atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$$

$$F_{cr} = (0,658 \frac{F_y}{F_e}) F_y \quad (2.6)$$

$$2) \text{ Bila } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ (atau } \frac{F_y}{F_e} > 2,25$$

$$F_{cr} = 0,887 F_e \quad (2.7)$$

Dimana F_e merupakan tegangan tekuk kritis elastis dengan rumus di bawah ini,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.8)$$

c. Komponen Struktur dengan Elemen Langsing

Tegangan kritis pada komponen struktur dengan elemen langsung ditentukan sebagai berikut.

$$1) \text{ Bila } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{Qf_y}} \text{ (atau } \frac{QF_y}{F_e} \leq 2,25$$

$$F_{cr} = Q \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad (2.9)$$

$$2) \text{ Bila } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{Qf_y}} \text{ (atau } \frac{QF_y}{F_e} > 2,25$$

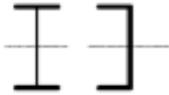
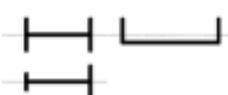
$$F_{cr} = 0,887 F_e \quad (2.10)$$

Dengan Q = faktor reduksi neto untuk semua elemen tekan langsing.

2.7.2.4 Komponen Struktur Lentur

Kekuatan lentur desain ($\phi_b M_n$) dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal (M_n) terendah yang diperoleh dari kondisi batas leleh (momen plastis) dan tekuk torsi-lateral. Faktor ketahanan lentur (ϕ_b) yang digunakan adalah 0,90. Pemilihan profil untuk komponen struktur lentur dilakukan dengan mengacu pada **Tabel 2. 6**.

Tabel 2. 6 Pemilihan untuk Penerapan Profil Komponen Struktur Lentur

Pasal dalam Bab F	Penampang Melintang	Kelangsingan Sayap	Kelangsingan Badan	Keadaan Batas
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	CFY, LTB, FLB, TFY
F5		C, NC, S	S	CFY, LTB, FLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, FLB
F7		C, NC, S	C, NC, S	Y, FLB, WLB, LTB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB, WLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Bentuk Tidak-Simetris, selain siku tunggal	N/A	N/A	Semua keadaan batas

Y = leleh, CFY = leleh sayap tekan, LTB = tekuk torsi-lateral, FLB = tekuk lokal sayap, WLB = tekuk lokal badan, TFY = leleh sayap tarik, LLB = tekuk lokal kaki, LB = tekuk lokal, C = kompak, NC = nonkompak, S = langsing, N/A = tidak berlaku

Sumber: Tabel F1.1 SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (2020)

a. Kondisi Pelelehan

Ketika seluruh area dalam penampang mengalami regangan leleh, kondisi ini disebut sebagai kondisi plastis. Dalam keadaan ini, tahanan momen nominal disebut sebagai momen plastis (M_p), yang dihitung sebagai hasil perkalian antara tegangan leleh dan modulus penampang plastis. Momen yang diperhitungkan adalah momen terhadap sumbu lemah. Kuat lentur plastis (M_p) merupakan momen yang menyebabkan seluruh penampang mencapai tegangan leleh dan harus diambil sebagai nilai yang lebih kecil dari $f_y \times Z$ atau $1.5 M_y$. Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan kekuatan lentur nominal (M_n) dalam kondisi pelelehan untuk komponen struktur dengan profil PSR berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, dan penampang boks.

$$M_n = M_p = f_y Z \quad (2.11)$$

dengan Z = modulus penampang plastis terhadap sumbu lentur (mm^3)

b. 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 non-kompak, elemen langsing (*slender*). Pada penampang boks, sayap yang luas dapat mengalami tekuk lebih awal dibandingkan profil terbuka. Oleh karena itu, desain jembatan dengan penampang boks harus memastikan bahwa b/t ratio tidak melebihi batas yang diperbolehkan.

- 1) Untuk penampang kompak, keadaan batas tekuk lokal sayap tidak berlaku.
- 2) Untuk penampang dengan sayap nonkompak,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(3,57 \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4,0 \right) \leq M_p \quad (2.12)$$

- 3) Untuk penampang dengan sayap langsing,

$$M_n = F_y S_e \quad (2.13)$$

dengan:

- 1) Untuk PSR,

$$b_e = 1,92t_f \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left[1 - \frac{0,38}{b/t_f} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right] \leq b \quad (2.14)$$

- 2) Untuk penampang berbentuk boks,

$$b_e = 1,92t_f \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left[1 - \frac{0,34}{b/t_f} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right] \leq b \quad (2.15)$$

S = modulus penampang elastis terhadap sumbu lentur (mm^3)

b = lebar sayap tekan (mm)

F_y = tegangan leleh (MPa)

t_f = tebal sayap (mm)

E = modulus elastisitas baja (MPa)

S_e = modulus penampang efektif yang ditentukan dengan lebar efektif sayap tekan (mm)

M_n = kekuatan lentur nominal (Nmm)

M_p = momen lentur plastis (Nmm)

c. Tekuk Lokal Badan

Tekuk lokal badan terjadi ketika badan balok baja mengalami deformasi akibat beban tekan atau geser yang tinggi. Tekuk ini bisa terjadi dalam beberapa mekanisme karena tekuk geser, tekuk akibat lentur, dan tekuk akibat kombinasi tekan dan geser.

- 1) Untuk penampang kompak, keadaan batas tekuk lokal badan tidak berlaku.
- 2) Untuk penampang dengan badan nonkompak,

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left(0,305 \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 0,738 \right) \leq M_p \quad (2.16)$$

- 3) Untuk penampang dengan badan langsing,

a. Leleh sayap tekan

$$M_n = R_{pg} F_y S \quad (2.17)$$

b. Tekuk lokal sayap tekan

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc} \quad (2.18)$$

dan

$$F_{cr} = \frac{0.9 E k_c}{\left(\frac{L}{t_f}\right)^2} \quad (2.19)$$

dengan:

h = tinggi badan (mm)

R_{pg} = didefinisikan $a_w = 2h t_w / (b t_f)$

k_c = 4,0

S = modulus penampang elastis terhadap sumbu lentur (mm³)

F_y = tegangan leleh (MPa)

E = modulus elastisitas baja (MPa)

t_w = tebal badan (mm)

b = lebar sayap tekan (mm)

t_f = tebal sayap (mm)

S_{xc} = modulus penampang elastis masing-masing pada sayap tekan dan tarik (mm³)

F_{cr} = tegangan kritis (MPa)

M_n = kekuatan lentur nominal (Nmm)

M_p = momen lentur plastis (Nmm)

d. Tekuk Lokal-Lateral

Tekuk torsi-lateral terjadi ketika beban yang bekerja pada elemen struktur menyebabkan perpindahan lateral dan puntiran. Kemungkinan terjadinya tekuk lateral bergantung pada panjang bentang elemen struktur. Untuk komponen struktur dengan profil PSR berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, dan penampang boks, perhitungan kekuatan lentur nominal dalam kondisi ini diklasifikasikan berdasarkan panjang bentang penampang.

1) Bila $L_b \leq L_p$, keadaan batas tekuk torsi-lateral tidak berlaku.

2) Bila $L_p < L_b < L_r$,

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.20)$$

3) Bila $L_b > L_r$,

$$M_n = 2EC_b \frac{\sqrt{J A_g}}{L_b / r_y} \leq M_p \quad (2.21)$$

dengan:

$$L_p = 0,13Er_y \frac{\sqrt{J A_g}}{M_p} \quad (2.22)$$

$$L_r = 2Er_y \frac{\sqrt{J A_g}}{0,7F_y S_x} \quad (2.23)$$

L_b = panjang antar titik-titik, baik yang dibreising melawan perpindahan lateral sayap tekan atau dibreising melawan punter penampang melintang (mm)

L_p = batas panjang bentang pendek (mm)

L_r = batas panjang bentang menengah (mm)

E = modulus elastisitas baja (MPa)

r_y = radius girasi terhadap sumbu y (mm)

F_y = tegangan leleh (MPa)

J = konstanta torsi (mm⁴)

c = koefisien c

S_x = modulus penampang elastis di sumbu x (mm³)

C_b = faktor modifikasi tekuk torsi lateral untuk diagram momen non merata bila kedua ujung segmen yang dibreising.

M_u = nilai mutlak momen maksimum dalam segmen tanpa dibreising (Nmm)

M_A = nilai mutlak momen pada titik $1/4$ dari segmen tanpa dibreising (Nmm)

M_B = nilai mutlak momen pada titik $1/2$ dari segmen tanpa dibreising (Nmm)

M_C = nilai mutlak momen pada titik $3/4$ dari segmen tanpa dibreising (Nmm)

F_{cr} = tegangan kritis (MPa)

M_n = kekuatan lentur nominal (Nmm)

M_p = momen lentur plastis (Nmm)

2.7.2.5 Komponen Struktur Geser

Kekuatan geser nominal (V_n) dihitung berdasarkan.

$$V_n = 0,6F_y A_w C_{v2} \quad (2.24)$$

dengan:

Untuk PSR persegi panjang dengan profil berbentuk boks,

$$A_w = 2ht \text{ (mm}^2\text{)}$$

C_{v2} = koefisien kekuatan tekuk geser badan

h = lebar yang menahan gaya geser (mm)

t = tebal dinding desain (mm)

2.7.2.6 Komponen Struktur yang Menahan Lentur dan Gaya Aksial

a. Komponen Struktur Simetris Ganda dan Tunggal Menahan Lentur dan Tekan

Komponen struktur yang menahan gaya aksial dan lentur harus direncanakan memenuhi ketentuan berikut.

1) Bila $\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0,2$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.25)$$

2) Bila $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0,2$

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.26)$$

dengan:

P_u = kekuatan aksial perlu menggunakan kombinasi beban DFBK (N)

ϕP_n = kekuatan aksial desain (N)

M_u = kekuatan lentur perlu menggunakan kombinasi beban DFBT (Nmm)

ΦM_n = kekuatan lentur desain (Nmm)

x = indeks sehubungan dengan sumbu kuat lentur

y = indeks sehubungan dengan sumbu lemah lentur

Φ = faktor ketahanan (tekan = 0,90; lentur = 0,90)

b. Komponen Struktur Simetris Ganda dan Tunggal untuk Lentur dan Tarik

Interaksi antara lentur dan gaya tarik pada komponen struktur dengan simetri ganda maupun simetri tunggal yang mengalami lentur terhadap sumbu geometris (x dan/atau y) harus dibatasi sesuai dengan persamaan berikut.

1) Bila $\frac{P_u}{\Phi P_n} \geq 0,2$

$$\frac{P_u}{\Phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.27)$$

2) Bila $\frac{P_u}{\Phi P_n} < 0,2$

$$\frac{P_u}{2\Phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.28)$$

dengan:

P_u = kekuatan aksial perlu menggunakan kombinasi beban DFBK (N)

ΦP_n = kekuatan aksial desain (N)

M_u = kekuatan lentur perlu menggunakan kombinasi beban DFBK (Nmm)

ΦM_n = kekuatan lentur desain (Nmm)

x = indeks sehubungan dengan sumbu kuat lentur

y = indeks sehubungan dengan sumbu lemah lentur

Φ = faktor ketahanan (tarik = Pasal D2 SNI 1729:2020; lentur = 0,90)

2.7.3 Sambungan

Sambungan memiliki peran vital dalam menjaga stabilitas struktur jembatan serta memastikan kinerja jangka Panjang terhadap beban yang bekerja. Berdasarkan SNI 1729:2020, sambungan pada struktur baja harus dirancang untuk menahan gaya aksial, geser, lentur serta kombinasi beban sesuai dengan metode perencanaan struktur yang digunakan. Sambungan dapat dibuat dengan metode baut, las, atau kombinasi keduanya tergantung kebutuhan structural dan kemudahan fabrikasi di lapangan. Setiap sambungan pada jembatan harus memenuhi ketentuan kapasitas minimum terhadap gaya-gaya dan kekakuan sambungan yang telah ditetapkan dalam SNI 1729:2020.

2.7.4 Tegangan

Setelah proses desain dan analisis menggunakan *software* SAP2000, tegangan pada jembatan dievaluasi melalui perhitungan manual. Tegangan pada komponen struktur harus dibatasi agar tidak melebihi nilai tegangan leleh (f_y) yang tercantum dalam **Tabel 2. 7**.

Tabel 2. 7 Sifat Mekanis Baja Struktural

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Sumber: Profil Hollow (PT. Sumber Makmur Surya Perkasa)

2.7.5 Lendutan

Dalam perencanaan struktur jembatan, pengendalian lendutan merupakan aspek krusial untuk memastikan kenyamanan dan keamanannya, serta menjaga integritas struktural jembatan. Lendutan yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada struktural dan mengurangi umur struktur jembatan. Batas lendutan yang diizinkan berdasarkan Pedoman Kompetisi Jembatan Indonesia (KJI) XIX tahun 2024 adalah Δ ijin ($\frac{L}{800} = 5 \text{ mm}$) dengan Δ optimal target ($2,5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$).