

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Jembatan Kereta Api Rangka Baja

2.1.1 Tipe Jembatan Kereta Api Rangka Baja

Jembatan kereta api rangka baja merupakan jembatan baja yang difungsikan untuk mengakomodir beban lalu lintas kereta api yang melintasi permukaan lantai jembatan (Nuranita, B., 2019). Menurut Peraturan Menteri Perhubungan PM. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, tipe jembatan baja secara umum dibagi empat kelompok sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Tipe jembatan baja

Tipe	Gelagar	Rangka
Dinding	Gelagar Dinding	Rangka Dinding
Rasuk/Dek	Gelagar Rasuk/Dek	Rangka Rasuk/dek

Sumber : PM 60 2012

Pada jembatan kereta api tipe rangka rasuk/dek, lantai kendaraan yang berada di atas konstruksi pemikul utama jembatan seperti pada Gambar 2.1. sedangkan pada jembatan kereta api rangka dinding, lantai kendaraan berada di bawah konstruksi pemikul utama jembatan. Terdapat dua tipe pada jembatan kereta api rangka dinding, yakni tipe *through truss* dengan pemberian rangka/perkuatan pada bagian atasnya seperti pada Gambar 2.2, dan tipe *pony truss* yang tidak diberi rangka/perkuatan silang di bagian atas jembatan seperti pada Gambar 2.3. Untuk tipe jembatan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah jembatan rangka baja tipe *through truss*.



Sumber : <https://id.scribd.com/document/111321024/03-Truss-Bridge>

Gambar 2.1 Jembatan kereta api tipe rasuk/dek



Sumber : <https://id.scribd.com/document/111321024/03-Truss-Bridge>

Gambar 2.2 Jembatan kereta api tipe *through truss*



Sumber : <https://docplayer.info/96428833-Kajian-risiko-bencana-kegagalan-teknologi-pada-jembatan-kereta-api-risk-assessment-on-seismic-vulnerability-of-railway-bridges.html>

Gambar 2.3 Jembatan kereta api tipe *pony truss*

2.1.2 Komponen Jembatan Kereta Api Rangka Baja

Elemen-elemen pada jembatan kereta api rangka baja dengan tipe *welded through truss* terdiri dari :

1. Bangunan Atas (*Upper Structure*)

Bangunan atas adalah konstruksi yang berhubungan langsung dengan beban-beban lalu lintas, orang, barang, dan berat sendiri konstruksi kemudian menyalurkan ke bangunan bawah. Adapun bangunan atas jembatan kereta api pada umumnya terdiri dari :

a. Gelagar Memanjang (*Stringer*)

Gelagar memanjang adalah balok yang menerima beban dari lantai kendaraan, dalam hal ini yang berfungsi sebagai lantai kendaraan adalah rel kereta api. Gaya dominan yang diterima adalah gaya lentur dan geser.

b. Gelagar Melintang (*Floor Beam*)

Gelagar melintang adalah balok yang berfungsi sebagai pemikul utama beban kendaraan, dalam hal ini kereta, yang selanjutnya diteruskan menuju rangka utama. Gaya dominan yang diterima adalah gaya lentur dan geser.

c. Rangka batang Utama

Rangka batang yang dimaksud adalah rangka batang yang terdiri dari batang diagonal (*counter*), batang tepi atas (*top chord*), batang tepi bawah (*bottom chord*), dan tiang ujung (*end post*).

Batang diagonal berfungsi sebagai elemen diagonal dari rangka batang utama, batang tepi atas terdiri dari elemen yang berfungsi menahan beban gravitasi dan elemen yang meneruskan beban lateral kepada tiang ujung, batang tepi bawah terdiri dari elemen yang berfungsi menahan beban gravitasi dan elemen yang meneruskan beban lateral kepada bangunan bawah jembatan. Sedangkan tiang ujung merupakan elemen diagonal terakhir dari rangka batang yang

berfungsi menahan dan menyalurkan beban gravitasi. Gaya dominan yang ditahan adalah gaya normal, dengan kapasitas batang tarik atau tekan.

d. Ikatan angin (*Lateral Bracing*)

Ikatan angin merupakan batang yang berfungsi untuk menahan beban lateral akibat angin, agar jembatan bekerja dalam keadaan stabil. Ikatan angin terdiri dari ikatan angin atas (*top lateral bracing*), batang desak lateral (*sway lateral*), dan ikatan angin bawah (*bottom lateral bracing*). Elemen-elemen ini berfungsi untuk mendapatkan kekakuan arah melintang struktur, stabilisasi akibat tertekannya batang tepi atas, serta menerima dan menyalurkan beban angin menuju tiang ujung kemudian meneruskannya ke perletakan.

e. Ikatan Tumbuk

Ikatan tumbuk merupakan batang yang berfungsi menahan benturan horizontal dari roda kereta api, batang ini biasanya dipasang antara kedua gelagar memanjang yang menumpu rel kereta. Ikatan tumbuk terdiri dari ikatan tumbuk lateral dan tegak atau disebut *stringer lateral* dan *stringer strut*.

f. Pengaku (*Stiffener*)

Pelat *stiffener* berfungsi memberi kekakuan terhadap rangka vertikal dan gelagar melintang, dengan mengurangi bidang tekuk arah tegak lurus bidang rangka.

g. Rel

Rel kereta api merupakan batangan baja longitudinal yang berhubungan secara langsung dan memberikan tumpuan terhadap pergerakan roda kereta api secara terus-menerus.

h. Bantalan Rel

Bantalan rel yang merupakan alas rel berfungsi menerima beban dari rel dan mendistribusikannya kepada rangka batang jembatan, dan

menahan pergerakan rel arah longitudinal, lateral dan vertikal. Material bantalan bisa menggunakan kayu, baja, atau beton.

i. Perletakan

Perletakan merupakan tumpuan utama jembatan yang berfungsi menyalurkan beban struktur atas baik vertikal, horizontal, maupun lateral ke struktur bawah jembatan. Pada jembatan, digunakan perletakan sendi dan rol.

2. Bangunan Bawah (*Sub Structure*)

Bangunan bawah adalah konstruksi yang berfungsi untuk menyalurkan beban-beban yang diberikan bangunan atas ke bagian fondasi yang selanjutnya disalurkan hingga bagian tanah keras di bawahnya. Adapun bangunan bawah jembatan kereta api pada umumnya terdiri dari :

a. Abutmen

Abutmen (kepala Jembatan) merupakan struktur bawah jembatan yang berada di kedua ujung jembatan, berfungsi menerima beban langsung dari struktur atas kemudian disalurkan menuju fondasi jembatan. Abutmen berfungsi juga sebagai pendukung bagian bangunan di atasnya dan sebagai penahan tanah timbunan oprit.

b. Pilar

Pada dasarnya, pilar dan abutmen memiliki fungsi yang sama, yakni menyalurkan beban dari struktur atas menuju fondasi jembatan, kemudian disebarkan ke tanah dasar yang keras. Perbedaannya abutmen terletak di kedua ujung jembatan, sedangkan pilar terletak di antara dua bentang jembatan atau lebih. Penggunaan pilar dilakukan untuk memperpendek bentang jembatan yang terlalu panjang. Selain itu penggunaan pilar harus mempertimbangkan kedalaman sungai dan perilaku sungai, serta elemen struktur yang akan digunakan.

c. Fondasi

Fondasi merupakan struktur bawah jembatan yang berfungsi menyalurkan seluruh beban yang berada di atasnya ke tanah dasar keras. Pembebanan pada fondasi harus mampu mengakomodir beban-beban luar secara vertikal di atasnya maupun beban arah lateral. Jenis fondasi yang umum digunakan pada jembatan adalah fondasi langsung, fondasi sumuran, dan fondasi dalam.

d. Pelat Injak

Pelat injak berfungsi untuk menahan hentakan pertama roda kendaraan ketika akan memasuki awal jembatan. Pelat ini sangat berpengaruh pada pekerjaan bangunan bawah karena jika dalam pelaksanaan pemadatan kurang sempurna, maka akan mengakibatkan terjadinya penurunan pada pelat injak yang menyebabkan permukaan lalu lintas tidak stabil.

Analisis yang dilakukan hanya pada bangunan atas jembatan meliputi gelagar memanjang (*stringer*), gelagar melintang (*floor beam*), batang diagonal (*counter*), batang tepi atas (*top chord*), batang tepi bawah (*bottom chord*), tiang ujung (*end post*), ikatan angin atas (*top lateral bracing*), batang desak lateral (*sway lateral*), ikatan angin bawah (*bottom lateral bracing*), dan ikatan tumbuk (*stringer lateral* dan *stringer strut*).

2.1.3 Persyaratan Sistem Jembatan Kereta Api

Sistem jembatan yang disyaratkan pada peraturan Lampiran PM 60 Tahun 2012 harus memenuhi persyaratan kekuatan dan persyaratan layan sebagai berikut:

1. Beban Gandar

Beban gandar yang digunakan sebagai dasar perencanaan harus sesuai dengan klasifikasi jalurnya dan beban terbesar dari sarana perkeretaapian yang dioperasikan.

2. Stabilitas Konstruksi

- a. Stabilitas konstruksi untuk jembatan bagian atas adalah kekuatan konstruksi yang diperhitungkan dari jumlah pembebanan dan kombinasi pembebanan.
- b. Stabilitas konstruksi untuk jembatan bagian bawah adalah kapasitas daya dukung tanah dan kekuatan konstruksi yang diperhitungkan dari jumlah kombinasi pembebanan yang terdiri dari beban-beban vertikal jembatan bagian atas, beban horizontal (gempa, angin, tekanan tanah, tekanan air), dan momen guling.
- c. Metode perhitungan desain struktur jembatan dapat menggunakan salah satu dari 2 (dua) metode, yakni metode desain tegangan ijin (*Allowable stress design*) dan metode faktor beban (*Limit state Design*).

3. Lendutan

Lendutan didefinisikan sebagai besaran penyimpangan (defleksi) yang tidak boleh melebihi persyaratan koefisien terhadap panjang teoritis.

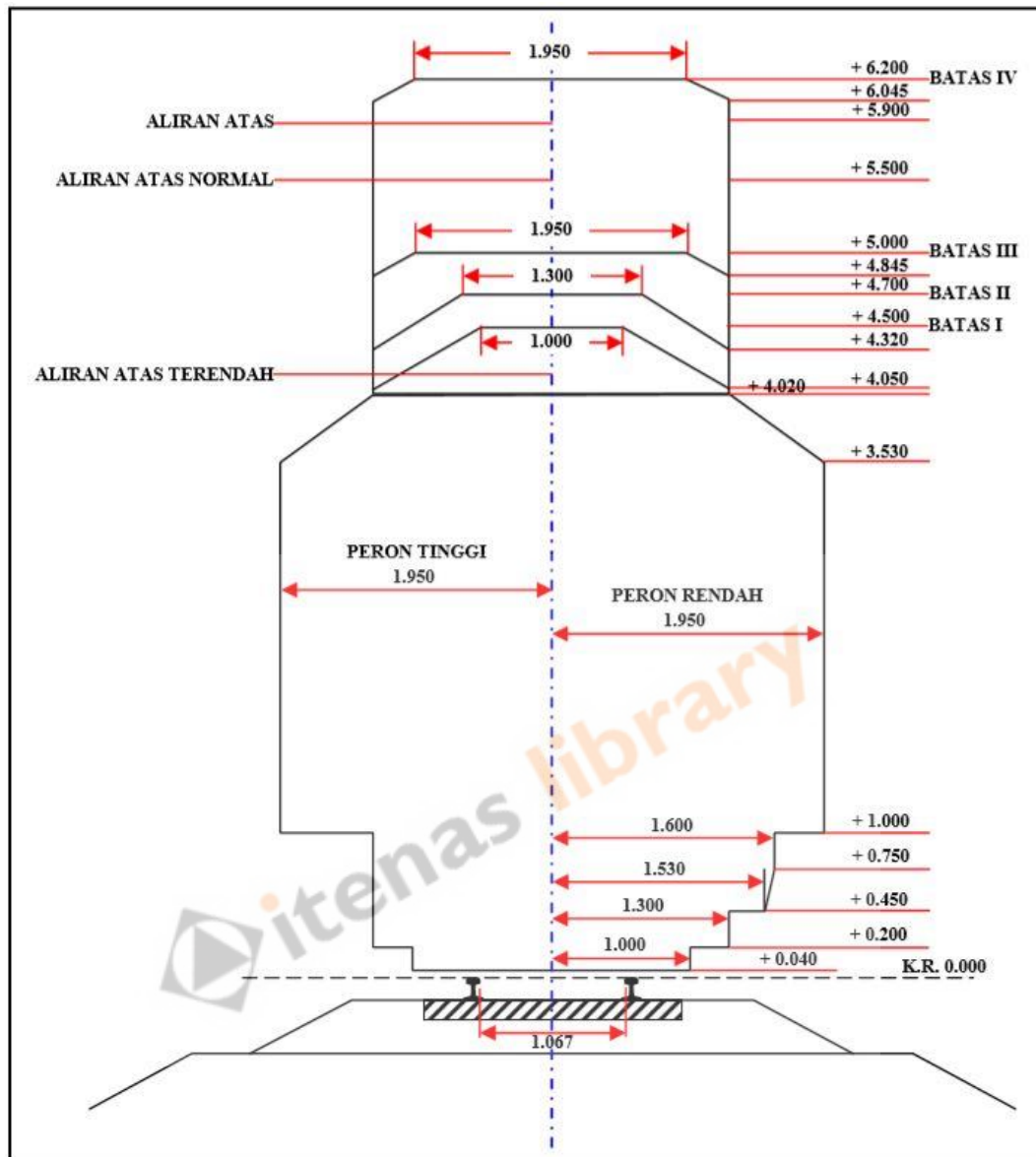
4. Ruang Bebas

Ruang bebas adalah ruang diatas jalan rel yang senantiasa harus bebas dari segala rintangan dan benda penghalang, ruang ini disediakan untuk lalu lintas rangkaian kereta api. Ukuran ruang bebas untuk jalur tunggal dan jalur ganda, baik pada bagian lintas yang lurus maupun yang melengkung, untuk lintas elektrifikasi dan non elektrifikasi. Ruang bebas ini diukur dari sumbu jalan rel dijelaskan di Tabel 2.2, Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 di bawah ini.

Tabel 2.2 Jarak ruang bebas

Segmen Jalur	Jalur Lurus	Jalur Lengkung $R < 800$
Lintas Bebas	Minimal 2.35 m di kiri kanan as jalan rel	$R \leq 300$, minimal 2.55 m $R > 300$, minimal 2.45 m Di kiri kanan as jalan rel
Emplasemen	Minimal 1.95 m di kiri kanan as jalan rel	Minimal 2.35 m di kiri kanan as jalan rel
Jembatan, terowongan	2.15 m di kiri kanan as jalan rel	2.15 m di kiri kanan as jalan rel

Sumber: PM.60 2012

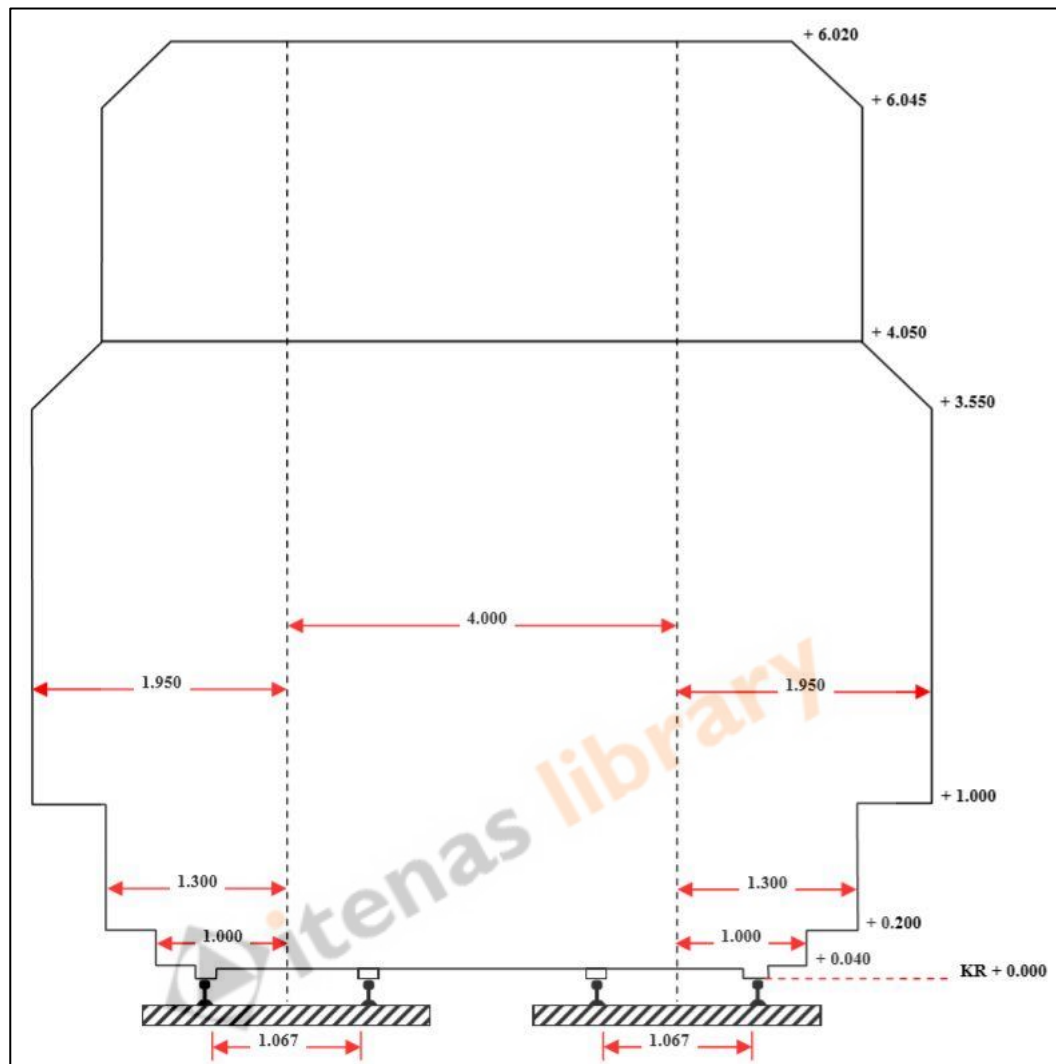


Keterangan :

Batas I	Untuk jembatan dengan kecepatan sampai 60 km/jam
Batas II	Untuk 'Viaduk' dan terowongan dengan kecepatan sampai 60 km/jam dan untuk jembatan tanpa pembatasan kecepatan
Batas III	Untuk 'Viaduk' baru dan bangunan lama kecuali terowongan dan jembatan
Batas IV	Untuk lintas kereta listrik

Sumber: PM.60 2012

Gambar 2.4 Ruang bebas *single track* pada jalur lurus untuk lebar jalan rel 1067 mm



Sumber: PM.60 2012

Gambar 2.5 Ruang bebas *double track* pada jalur lurus untuk lebar jalan rel 1067 mm

2.1.4 Persyaratan Material

Sifat mekanis baja struktural yang digunakan dalam perencanaan harus memenuhi persyaratan umum yang diberikan pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.3 Sifat mekanis baja struktural

Mutu baja	Tegangan putus minimum, f_u (Mpa)	Tegangan leleh minimum, f_y (Mpa)	Regangan 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 : RSNI-T-03-2005 Perencanaan struktur baja untuk jembatan

Tabel 2.4 Material baja standar JIS (Jepang)

Kategori kuat	Standar	Mutu	Kuat leleh (MPa)		Kuat tarik (MPa)		Rasio leleh %	Elongasi %
			Min	Maks	Min	Maks		
400 N/mm ²	JIS G 3101 (SS Steel)	SS400	235		400	510	-	21
	JIS G 3106 (SM Steel)	SM400A	235		400	510	-	24
		SM400B	235		400	510	-	21
		SM400C	235		400	510	-	22
	JIS G 3136 (SN Steel)	SN400A	235	-	400	510	-	24
		SN400B	235	355	400	510	80	21
		SN400C	235	355	400	510	80	22
490 N/mm ²	JIS G 3101 (SS Steel)	SS490	275		490	610	-	21
	JIS G 3106 (SM Steel)	SM490A	315		490	610	-	24
		SM490B	315		490	610	-	21
		SM490C	315		490	610	-	22
	JIS G 3136 (SN Steel)	SN490B	325	445	490	610	80	21
		SN490C	325	445	490	610	80	22

Sumber : Japanese Architectural Standard Specification JASS 6 (1996)

Sifat-sifat mekanis baja struktural lainnya untuk maksud perencanaan ditetapkan sebagai berikut:

Modulus elastisitas : $E = 200.000 \text{ MPa}$

Modulus geser : $G = 80.000 \text{ MPa}$

Angka poisson : $\mu = 0.3$

Koefisien pemuaian : $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}$

2.2 Persyaratan Desain Jembatan Kereta Api

2.2.1 Peraturan Lampiran PM 60 Tahun 2012

Pada Lampiran PM 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api memuat mengenai persyaratan teknis jalur kereta api untuk lebar jalan rel 1067 mm, persyaratan tata letak, tata ruang dan lingkungan, persyaratan teknis jalan rel, serta persyaratan teknis jembatan yang kemudian menjadi acuan-acuan yang digunakan dalam menganalisis jembatan kereta api rangka baja pada penelitian ini.

1. Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api

a. Beban Gandar Maksimum

Beban gandar adalah beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar. Beban gandar disyaratkan sebesar 18 ton untuk lebar jalan rel 1067 mm.

b. Kelas Jalan Rel

Kelas jalan rel mengacu pada Tabel 2.5 berikut ini.

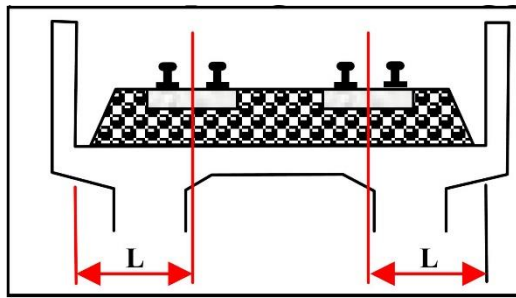
Tabel 2.5 Lebar jalan rel 1067 mm (PM 60 2012)

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
					Jarak antar sumbu bantalan (cm)			
I	$> 20 \cdot 10^6$	120	18	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	60
II	$10 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 60	Elastis Ganda	30	50
III	$5 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6$	100	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda	30	40
IV	$2,5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$	90	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda/Tunggal	25	40
V	$< 2,5 \cdot 10^6$	80	18	R.42	Kayu/Baja 60	Elastis Tunggal	25	35

Sumber: PM 60 2012

2. Persyaratan Teknis Jalan Rel

- a. Lebar badan jalan (L) untuk jalan rel diatas permukaan tanah (jalan rel layang) harus ≥ 2.75 m dari as jalan rel untuk jalan lurus. Adapun penampang lebar badan jalan rel ganda seperti pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Sumber: PM. 60 2012

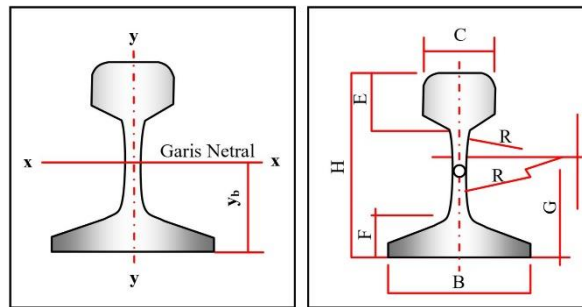
Gambar 2.6 Penampang lebar badan jalan rel ganda

- b. Bantalan dapat berupa beton, kayu, atau baja dengan dimensi :
- Untuk lebar jalan rel 1067 mm, digunakan panjang 2000 mm, lebar maksimum 260 mm, dan tinggi maksimum 220 mm.
 - Spasi antar bantalan 600 mm.
- c. Penampang Rel harus memenuhi ketentuan dimensi rel seperti pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.7 dibawah ini.

Tabel 2.6 Dimensi penampang rel

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A	= luas penampang			
W	= berat rel permeter			
I _x	= momen inersia terhadap sumbu x			
Y _b	= jarak tepi bawah rel ke garis netral			

Sumber : PM. 60 2012



Sumber: PM. 60 2012

Gambar 2.7 Dimensi penampang rel

3. Persyaratan Beban

a. Beban Mati (D)

Beban mati adalah semua beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan atau bagian jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsur tambahan yang dianggap merupakan satu kesatuan tetap dengannya. Berat jenis bahan yang biasanya digunakan dalam perhitungan beban mati sebagaimana Tabel 2.7 dibawah ini.

Tabel 2.7 Berat jenis bahan (PM 60 2012)

Baja, Baja Cor	78.50 kN/m ³
Besi Cor	72.50 kN/m ³
Kayu	8.00 kN/m ³
Beton	24.00 kN/m ³
Aspal Anti Air	11.00 kN/m ³
Ballast Gravel atau Batu Pecah	19.00 kN/m ³

Sumber : PM. 60 2012

b. Beban Hidup (L)

Beban hidup yang digunakan adalah beban gandar terbesar sesuai rencana sarana perkeretaapian yang dioperasikan atau skema dari rencana muatan. Untuk beban gandar sampai dengan 18 ton dapat digunakan skema rencana muatan 1921 (RM 21) sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.8. Untuk beban gandar lebih besar dari 18 ton, rencana muatan disesuaikan dengan kebutuhan tekanan gandar.

Tabel 2.8 Skema pembebanan rencana muatan 1921 (RM 21)

Rencana Muatan 1921	
<p>Muatan Gerak Sebagai muatan gerak dianggap suatu susunan kereta api terdiri dari 2 lokomotif pakai tender, serupa demikian :</p>	
<p style="text-align: center;">Jumlah berat 168 ton atau 8,75 ton/m</p>	
<p>Bila dengan kereta / gerobak yang banyaknya tidak tertentu, serupa demikian :</p>	
<p style="text-align: center;">Jumlah 24 ton atau 5 ton/m</p>	
<p>Susunan kereta itu selalu dibikin sehingga bagi bagian yang harus dihitung kekuatannya paling berbahaya. Jika ada 6 atau 7 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 15 ton.</p>	
<p>Jika hanya ada 5 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 17 ton.</p>	
<p>Jika hanya ada 3 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 18 ton.</p>	
<p>Jika hanya ada 2 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 19 ton.</p>	
<p>Jika hanya ada 1 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 20 ton.</p>	
<p>Dari rencana-rencana muatan tersebut, selalu yang dipilih itu rencana yang pendapatannya paling berbahaya bagi yang dihitungnya.</p>	

Sumber : PM. 60 2012

c. Beban Mati Tambahan (SDL)

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan. Beban mati tambahan dalam penelitian ini mencakup beban bantalan, beban rel, beban penambat dan sambungan, dan beban jembatan pejalan kaki untuk pemeliharaan jembatan kereta api.

d. Beban Kejut (I)

Beban kejut diperoleh dengan mengalikan faktor i terhadap beban kereta. Perhitungan paling sederhana untuk faktor i adalah dengan menggunakan Persamaan 2.1 hingga 2.3 sebagai berikut.

$$- \text{ Untuk rel pada alas balas, } i = 0.1 + \frac{22.5}{50+L} \quad (2.1)$$

$$- \text{ Untuk rel pada Perletakan kayu, } i = 0.2 + \frac{25}{50+L} \quad (2.2)$$

$$- \text{ Untuk rel secara langsung pada baja, } i = 0.3 + \frac{25}{50+L} \quad (2.3)$$

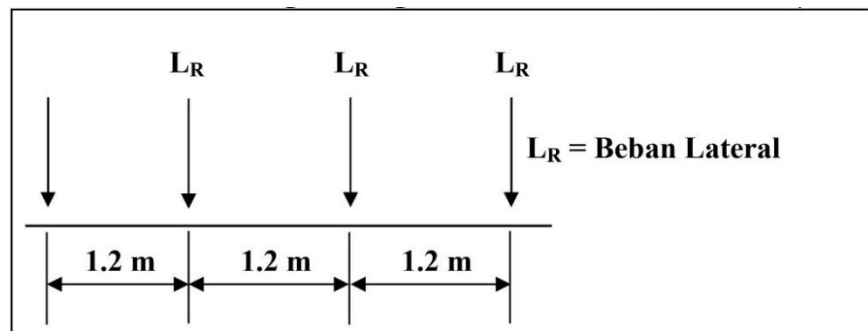
Dimana :

$$i = \text{Faktor kejut,}$$

$$L = \text{Panjang bentang (m).}$$

e. Beban Lateral Kereta (L_R)

Beban lateral kereta adalah beban bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel, secara horizontal. Besaran adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif atau kereta listrik/diesel.



Sumber : PM. 60 2012

Gambar 2.8 Beban lateral kereta

f. Beban Rem dan Traksi

Beban pengereman dan traksi masing-masing adalah 25% dari beban kereta, bekerja pada pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal).

g. Beban Rel Panjang Longitudinal (L_F)

Beban rel panjang longitudinal pada dasarnya adalah 10 kN/m, maksimum 2000 kN.

h. Beban Angin

Pada penelitian ini, beban angin yang digunakan mengacu pada Standar SNI 1725 2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan.

- Beban Angin Arah Horizontal

Tekanan angin diasumsikan disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam. Beban angin harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 10000 mm di atas permukaan tanah atau permukaan air, V_{DZ} , harus dihitung dengan Persamaan 2.4 berikut:

$$V_{DZ} = 2,5 V_o \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_o} \right) \quad (2.4)$$

Keterangan :

V_{DZ} = Kecepatan angin rencana pada elevasi rencana, Z (km/jam).

V_{10} = Kecepatan angin pada elevasi 10000 mm diatas permukaan tanah atau diatas permukaan air rencana (km/jam).

V_B = Kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm.

Z = Elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari permukaan air dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm).

V_o = Kecepatan gesekan angin, yang merupakan karakteristik meteorologi.

Z_o = Panjang gesekan di hulu jembatan, yang merupakan karakteristik meteorologi.

V_{10} dapat diperoleh dari grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang, survei angin pada lokasi jembatan, dan jika tidak ada data yang lebih baik, perencana dapat mengasumsikan bahwa $V_{10} = V_B = 90$ s/d 126 km/jam. Nilai V_o dan Z_o dapat dilihat pada Tabel 2.9 sebagai berikut.

Tabel 2.9 Nilai V_o dan Z_o untuk berbagai variasi kondisi permukaan

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
V_o (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Z_o (mm)	70	1000	2500

Sumber: SNI 1725 2016

- **Beban Angin Pada Struktur (EW_S)**

Arah angin rencana harus diasumsikan horizontal, dengan tidak adanya data yang lebih tepat, tekanan angin rencana dalam MPa dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \quad (2.5)$$

Keterangan :

P_B = tekanan angin dasar dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Tekanan angin dasar

Komponen bangunan atas	Angin tekan (MPa)	Angin hisap (MPa)
Rangka, kolom, dan pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan datar	0,0019	N/A

Sumber: SNI 1725 2016

- **Beban Angin Pada Kendaraan (EW_I)**

Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1.46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan. Jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka komponen yang bekerja tegak lurus maupun paralel terhadap kendaraan untuk berbagai sudut serang dapat diambil seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.11 dimana arah sudut serang ditentukan tegak lurus terhadap arah permukaan kendaraan.

Tabel 2.11 Komponen beban angin yang bekerja pada kendaraan

Sudut derajat	Komponen tegak lurus N/mm	Komponen sejajar N/mm
0	1,46	0,00
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

Sumber: SNI 1725 2016

4. **Kombinasi Beban**

Perhitungan kekuatan konstruksi jembatan dihitung dari kombinasi pembebanan yang memberikan beban terbesar pada komponen yang ditinjau seperti pada Tabel 2.12. Kombinasi pembebanan dapat mengacu

pada standar SNI 1725 2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan. Beban permanen dan beban transien sebagai berikut harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan:

a. Beban Permanen

- MS = Beban mati komponen struktural dan non struktural jembatan.
- MA = Beban mati tambahan (struktur rel KA dan utilitas).
- TA = Gaya horizontal akibat tekanan tanah.
- PL = Gaya-gaya yang terjadi pada struktur jembatan yang disebabkan oleh proses pelaksanaan, termasuk semua gaya yang terjadi akibat perubahan statika yang terjadi pada konstruksi segmental.
- PR = Prategang.
- RL = Beban rel panjang longitudinal.

b. Beban Transien

- SH = Gaya akibat susut/rangkak.
- TB = Gaya akibat rem.
- TR = Gaya sentrifugal.
- TL = Gaya lateral.
- TD = Gaya kejut/dinamik.
- EQ = Gaya gempa.
- DR = Beban *derailment*.
- TK = Beban hidup KA.
- ES = Beban akibat penurunan.
- TG = Gaya akibat temperatur gradien.
- EUn = Gaya akibat temperatur seragam.
- EW_s = Beban angin pada struktur.
- EW_L = Beban angin pada kereta.
- EF = Aliran air, benda hanyutan dan tumbukan dengan batang kayu.

Tabel 2.12 Kombinasi beban dan faktor beban

Keadaan Batas	MS	TK	EF	EW _s	EW _L	EUn	TG	ES	EQ	DR
	MA TA PR PL SH RL									
Kuat I	γ_p	1,80	1,00	-	-	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Kuat II	γ_p	1,40	1,00	-	-	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Kuat III	γ_p	-	1,00	1,40	-	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Kuat IV	γ_p	-	1,00	-	-	0,50/1,20	-	-	-	-
Kuat V	γ_p	-	1,00	0,40	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Ekstrem I	γ_p	γ_{EQ}	1,00	-	-	-	-	-	1,00	-
Ekstrem II	γ_p	0,50	1,00	-	-	-	-	-	-	1,00
Daya layan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Daya layan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00/1,20	-	-	-	-
Daya layan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-
Daya layan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00/1,20	-	1,00	-	-
Fatik (TK dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan :

- γ_p dapat berupa γ_{MS} , γ_{MA} , γ_{TA} , γ_{PR} , γ_{PL} , dan γ_{SH} tergantung beban yang ditinjau.
- γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa.

Keterangan keadaan batas :

Kuat I : Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai.

Kuat II : Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kereta api khusus yang ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin.

- Kuat III : Kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenai beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Kuat IV : Kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar.
- Kuat V : Kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Ekstrem I : Kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup γ_{EQ} yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan.
- Ekstrem II : Kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup berkurang dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat *derailment* kereta api (DR). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasikan dengan beban *derailment* kereta api dan tumbukan kapal.
- Layan I : Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhitungkan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam. Kombinasi ini juga digunakan untuk mengontrol lendutan pada gorong-gorong baja, pelat pelapis terowongan, pipa termoplastik serta untuk mengontrol lebar retak struktur beton bertulang dan juga untuk analisis tegangan tarik pada penampang melintang jembatan beton segmental. Kombinasi pembebanan ini juga harus digunakan untuk investigasi stabilitas lereng.
- Layan II : Kombinasi pembebanan yang ditujukan untuk mencegah terjadinya pelelehan pada struktur baja dan selip pada sambungan akibat beban kereta api.
- Layan III : Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada arah memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk

mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental.

Layan IV : Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak.

Fatik : Kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas.

2.3 Analisis Struktur

2.3.1 Kondisi Batas

Metode perhitungan desain struktur jembatan dapat menggunakan salah satu dari dua kondisi batas berikut:

1. Metode Desain Tegangan Ijin (*Allowable Stress Design*)

Konsep ASD (*Allowable Stress Design*) adalah beban atau tegangan yang terjadi harus lebih kecil dari beban atau tegangan ijin. Beban atau tegangan yang terjadi dihitung berdasarkan pada beban yang terjadi pada struktur atau member dan beban atau tegangan ijin didapat dari kekuatan maksimum material dibagi dengan safety factor.

ASD membandingkan tegangan aktual yang terjadi dari adanya beban dengan tegangan yang diijinkan. Tegangan ijin yang dimaksud ada di bawah tegangan leleh material, sehingga di ASD ini, tidak dikenal adanya konsep perilaku inelastis (kekuatan material pasca leleh hingga mencapai titik ultimitnya). Persamaan umum ASD seperti berikut :

$$Ru \leq Rn/\Omega \quad (2.6)$$

Selain itu, kekurangan dari ASD lama ini adalah tidak dikenal adanya daktilitas. Fungsinya daktilitas adalah sebagai *early warning* kegagalan struktur akibat adanya beban yang tak terduga, misalnya seperti beban gempa.

2. Metode Keadaan Batas (*Limit State Design*)

Dikenal juga dengan metode LRFD (*Load Resistance Factor Design*). Perencanaan komponen struktur jembatan didasarkan pada cara Perencanaan Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT), yang harus memenuhi kriteria keamanan untuk semua jenis gaya dalam. Kekuatan rencana tidak kurang dari pengaruh aksi rencana sebagai berikut :

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (2.7)$$

LRFD membandingkan kuat yang diperlukan oleh suatu material akibat kombinasi beban yang diterima, dengan kekuatan nominal material yang dikalikan dengan suatu faktor reduksi kekuatan ϕ . LRFD mengizinkan penggunaan kekuatan ultimit untuk perhitungan kekuatan nominalnya. Sehingga, LRFD mengizinkan material untuk bekerja hingga pada kondisi inelastis. Faktor reduksi kekuatan, ϕ diambil dari nilai-nilai yang dapat dilihat pada Tabel 2.13 di bawah ini.

Tabel 2.13 Faktor reduksi kekuatan untuk keadaan batas ultimit

Situasi Rencana	Faktor Reduksi Kekuatan ϕ
a. Lentur	0,90
b. Geser	0,90
c. Aksial Tekan	0,85
d. Aksial Tarik	
- Terhadap kuat tarik leleh	0,90
- Terhadap kuat tarik fraktur	0,75
e. Penghubung Geser	0,75
f. Sambungan baut	0,75
g. Hubungan Las	
- Las tumpul penetrasi penuh	0,90
- Las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75

Sumber : RSNI T-03-2005: Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan

2.4 Pengecekan Jembatan Kereta Api Rangka Baja

2.4.1 Lendutan

Struktur dan komponen terkait harus didesain untuk keadaan batas layanan dengan mengendalikan atau membatasi besar lendutan. Lendutan didefinisikan sebagai besaran penyimpangan (defleksi) yang tidak boleh melebihi persyaratan koefisien terhadap bentang jembatan. Defleksi balok harus ditetapkan dengan batasan yang sesuai. Defleksi balok baja akibat beban mati dan beban hidup pada dasarnya tidak boleh melampaui koefisien lendutan maksimum jembatan baja, sebagaimana tersebut dalam Tabel 2.15 di bawah ini.

Tabel 2.14 Koefisien lendutan maksimum jembatan baja

Jenis	Gelagar			Rangka batang
	L (m)	$L < 50$	$L \geq 50$	Seluruh rangka
Lokomotif		$L/800$	$L/700$	$L/1000$
Kereta listrik dan/atau kereta	V (km/h)	$V < 100$	$L/700$	
		$100 < V \leq 130$	$L/800$	$L/700$
		$100 < V \leq 130$	$L/1100$	$L/900$

Sumber : PM 60 2012

2.4.2 Pengecekan Kapasitas Penampang

Pada dasarnya profil yang digunakan pada tiap elemen dipilih dengan cara memperhitungkan kapasitas masing-masing penampang tersebut untuk menahan gaya dalam maksimum yang terjadi. Metode yang digunakan adalah metode faktor beban atau dikenal dengan metode LRFD (Load and Resistance Factor Design), yang didasarkan pada perencanaan beban dan kekuatan terfaktor yang harus memenuhi kriteria keamanan untuk semua jenis gaya dalam. Untuk pengecekan kapasitas penampang mengacu pada RSNI T-03-2005 tentang Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan dan juga pada buku Wiryanto Dewobroto Struktur Baja, Perilaku, Analisis dan Desain – AISC 2010 Edisi ke-2.

2.4.2.1 Stabilitas Batang Tarik

Batang tarik merupakan elemen batang pada struktur yang menerima gaya aksial tarik murni. Sebuah batang tarik dapat mengalami kegagalan apabila mencapai satu dari dua batasan yaitu deformasi yang berlebihan atau fraktur. Untuk mencegah deformasi yang berlebihan, dimulai dengan beban pada luas penampang bruto (A_g) harus cukup kecil sehingga tegangan pada luas penampang bruto (A_g) kurang dari tegangan leleh (F_y). Untuk mencegah fraktur, tegangan pada luas penampang netto efektif (A_e) harus lebih kecil dibandingkan dengan tegangan fraktur/ultimit (F_u). Pada permasalahan ini, tegangan P/A harus lebih kecil dibandingkan dengan tegangan batas F . Sehingga tahanan nominal dalam kondisi leleh memenuhi Persamaan 2.8.

$$P_u \leq \theta(F_y \times A_g) \quad (2.8)$$

dan tahanan nominal pada kondisi fraktur memenuhi Persamaan 2.9.

$$P_u \leq \theta(F_u \times A_e) \quad (2.9)$$

dimana θ merupakan faktor reduksi kekuatan sesuai LRFD, untuk kondisi leleh 0,9 dan untuk kondisi fraktur 0,75. Luas penampang netto efektif (A_e) merupakan hasil perkalian dari luas netto (A_{net}) dengan koefisien reduksi (u) akibat adanya eksentrisitas pada sambungan yang disebut *shear leg*, sehingga menghasilkan penampang netto efektif yang besarnya memenuhi Persamaan 2.10.

$$A_e = A_{net} \times U \quad (2.10)$$

dimana koefisien reduksi (U) untuk sistem sambungan yang menggunakan baut memenuhi Persamaan 2.11.

$$U = 1 - \frac{X}{L} \leq 0,9 \quad (2.11)$$

Keterangan:

- X = jarak antara titik berat penampang komponen yang disambung dengan bidang sambungan
- L = panjang sambungan pada arah gaya

1. Kelangsingan Batang Tarik

Kelangsingan komponen struktur batang tarik memenuhi Persamaan 2.12.

$$\lambda = \frac{L_k}{r} \leq 240 \quad (2.12)$$

Keterangan:

- λ = kelangsingan
- L_k = panjang batang tarik
- r = jari-jari inersia

2.4.2.2 Stabilitas Batang Tekan

Batang tekan merupakan bagian dari elemen struktur yang hanya menerima gaya aksial. Gaya aksial ini terjadi sepanjang arah sumbu longitudinal yang berada di titik tengah bidang diagonal elemennya. Pada batang yang langsing tekanan sebelum tekuk berada dibawah batas proporsional yaitu batang masih dalam kondisi elastis, maka beban tekuk kristis memenuhi Persamaan 2.13.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times EI}{L^2} \quad (2.13)$$

Keterangan:

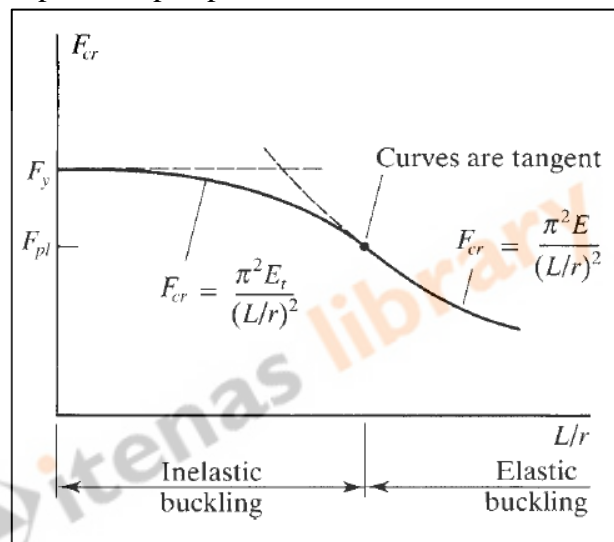
P_{cr} = beban tekuk kritis

E = modulus elastisitas penampang

I = momen inersia penampang

L = panjang batang tekan

Untuk beberapa material, tegangan tekuk kritis (F_{cr}) dapat diplot berdasarkan fungsi dari kelangsingan seperti tampak pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Tegangan tekuk kritis pada kondisi in-elastis dan elastis

Tahanan nominal tekan untuk LRFD memenuhi persamaan 2.14.

$$P_u \leq \theta \times F_{cr} \times A_g \quad (2.14)$$

Keterangan:

P_u = beban terfaktor

θ = faktor untuk tekan sebesar 0,9

F_{cr} = tegangan tekuk kritis

A_g = luas penampang bruto

dalam kondisi elastis dimana $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ tegangan tekuk kritis memenuhi persamaan 2.15.

$$F_{cr} = 0,877 \times F_e \quad (2.15)$$

dan dalam kondisi in-elastis dimana $\frac{KL}{r} > 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ tegangan tekuk kritis memenuhi persamaan 2.16.

$$F_{cr} = (0,658 \frac{F_y}{F_e}) \times F_y \quad (2.16)$$

dimana F_e memenuhi persamaan 2.17.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.17)$$

2.4.2.3 Stabilitas Elemen Lentur

Suatu komponen struktur yang memikul momen lentur terhadap sumbu lemah dapat dianalisis dengan metode elastis yang harus memenuhi Persamaan 2.18.

$$M_u \leq \theta M_n \quad (2.18)$$

Keterangan:

M_u = Momen lentur terfaktor

M_n = Kuat nominal momen lentur penampang

θ = Faktor reduksi, diambil 0,9

1. Kuat Lentur Nominal Penampang dengan Pengaruh Tekuk Lokal

Kuat lentur nominal ini meliputi *Flange Local Buckling* (FLB) dan *Web Local Buckling* (WLB) yang harus memenuhi persyaratan berikut ini :

a. Batasan Momen

Momen leleh (M_y) merupakan momen lentur yang menyebabkan penampang mulai mengalami tegangan leleh dengan besaran memenuhi persamaan 2.19.

$$M_y = F_y \times S \quad (2.19)$$

Keterangan:

M_y = Momen leleh

F_y = Tegangan leleh penampang

S = Modulus elastisitas penampang

Kuat lentur plastis (M_p) adalah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh dengan besaran memenuhi Persamaan 2.20.

$$M_p = F_y \times Z_x < 1,6 \times F_y \quad (2.20)$$

Keterangan:

M_p = Momen plastis

F_y = Tegangan leleh penampang

Z_x = Modulus penampang elastis

b. Kelangsingan Penampang

AISC mengklasifikasikan bentuk penampang terhadap bentuk kompak, tidak kompak tergantung terhadap nilai rasio parameter kelangsingan. Untuk profil IWF, rasio untuk memproyeksikan bagian sayap (sebuah elemen yang tidak kaku) adalah $b_f/2t_f$, dan rasio untuk bagian badan (sebuah elemen yang kaku) adalah h/t_w , jika :

$\lambda \leq \lambda_p$, maka penampang kompak

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, maka penampang tidak kompak

$\lambda > \lambda_r$, maka penampang langsing

Besaran nilai rasio kelangsingan dapat dilihat pada Gambar 2.10.

Element	λ	λ_p	λ_r
Flange	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Web	$\frac{h}{t_w}$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

*For hot-rolled I shapes in flexure.

Gambar 2.10 Nilai rasio kelangsingan untuk profil IWF

Untuk penampang kompak, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi Persamaan 2.23.

$$M_n = M_p \quad (2.21)$$

untuk penampang tidak kompak, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.22.

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (2.22)$$

untuk penampang langsing, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.23.

$$M_n = 0,7F_y S_x \left(\frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.23)$$

Keterangan:

M_p = momen plastis

F_y = tegangan leleh

λ = parameter kelangsingan

λ_p = batasan maksimum parameter kelangsingan untuk penampang tidak kompak

λ_r = batasan maksimum parameter kelangsingan untuk penampang kompak

2. Kuat Lentur Nominal Penampang dengan Pengaruh Tekuk Lateral

Kuat lentur nominal ini harus memenuhi persyaratan :

a. Batasan Momen

Momen kritis terhadap tekuk torsi lateral (M_{cr}) ditentukan oleh Persamaan 2.24.

$$M_{cr} = C_b \times \frac{\pi}{L} \times \sqrt{E \times I_y \times G \times J + \left(\frac{\pi \times E}{L} \right)^2 \times I_y \times I_w} \quad (2.24)$$

dengan:

E = modulus elastisitas

I_y = momen inersia penampang

G = modulus geser baja

J = konstanta torsi = $2 \times \left(\frac{bf \times t^3}{3} \right)$

I_w = konstanta warping atau putir lengkung

C_b = faktor pengali momen

Faktor pengali momen memenuhi persamaan 2.25.

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 2,3 \quad (2.25)$$

dengan:

M_{max} = momen maksimum pada bentang yang ditinjau

M_A, M_B, M_C = momen pada $\frac{1}{4}$ bentang, $\frac{1}{2}$ bentang, dan $\frac{3}{4}$ Bentang

b. Pengekang Lateral

Kekuatan momen lentur dari penampang kompak adalah fungsi dari panjang yang tidak terkekang (L_b), didefinisikan sebagai jarak antara titik-titik dukungan lateral, atau menguatkan. Dalam menentukan batas perilaku elastis dan elastis dengan membandingkan besaran nilai L_b , L_r , dan L_p . Panjang L_r memenuhi Persamaan 2.26.

$$L_r = 1,95 r_{ts} \frac{E}{0,7 F_y} \sqrt{\frac{JC}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{JC}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.26)$$

Panjang L_p memenuhi Persamaan 2.27.

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.27)$$

Untuk penampang tidak ada kestabilan ($L_b \leq L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi Persamaan 2.28.

$$M_n = M_p = F_y \times Z_x \quad (2.28)$$

untuk penampang tidak elastis ($L_p < L_b \leq L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi Persamaan 2.29.

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7 F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right) \quad (2.29)$$

untuk penampang elastis ($L_b > L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi Persamaan 2.30.

$$M_n = F_{cr} \times S_x \leq M_p \quad (2.30)$$

Dengan:

$$F_{cr} = \frac{cb \times \pi^2}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{JC}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (2.31)$$