

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

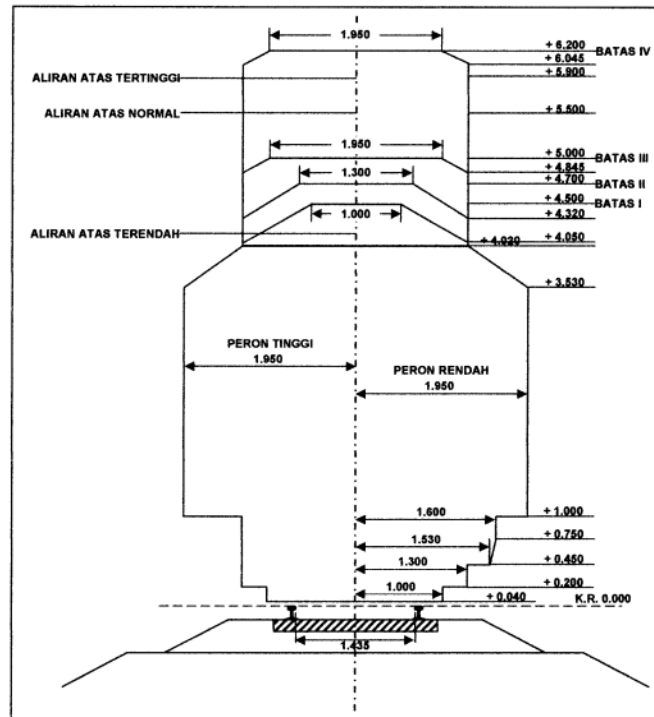
### **II.1 Perencanaan Konstruksi Jalur Kereta Api**

Persyaratan teknis untuk konstruksi jalur kereta api perlu direncanakan sedetail dan sebaik mungkin untuk menjamin agar aman, nyaman, dan terhindar dari kecelakaan yang tidak diinginkan. Selain itu, adanya perencanaan tersebut dapat memudahkan para pihak Kereta Api Indonesia untuk *maintenance*, mengoperasikannya, serta menggunakannya sesuai dengan fungsinya. Anggaran pembangunan juga menjadi lebih minim, namun tetap mendapatkan mutu pembangunan yang sesuai dengan persyaratan teknis. Perencanaan ini tertulis dalam Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut:

- 1) total keseluruhan beban;
- 2) kecepatan maksimum kereta api;
- 3) beban gandar, dan;
- 4) pola operasi.

### **II.2 Perencanaan Berdasarkan Pengaturan Ruang Bebas dan Ruang Bangun**

Ruang bebas merupakan ruang yang harus bebas dari rintangan-rintangan dan penghalang yang ada, fungsinya untuk menyediakan ruang bagi lalu lintas kereta api. Berikut adalah ilustrasi ukuran ruang bebas untuk lebar rel 1067 mm pada bagian lurus.



Gambar II.1 Ruang Bebas pada Bagian Lurus

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

Keterangan:

- Batas I untuk jembatan dengan kereta api berkecepatan hingga 60 km/jam.
- Batas II untuk viaduk dan terowongan dengan kereta api berkecepatan hingga 60 km/jam, serta untuk jembatan yang tidak memiliki pembatasan kecepatan pada kereta api.
- Batas III untuk viaduk yang baru atau bangunan lama.
- Batas IV untuk perlintasan pada kereta api listrik.

Ruang bangun merupakan ruang di sisi-sisi jalan rel kereta api yang harus bebas dari bangunan-bangunan tetap. Batas ruang bangun dari tinggi 1 meter hingga 3,55 meter yang diukur dari sumbu jalan rel kereta api. Berikut adalah tabel ketetapan jarak ruang bangun untuk lebar rel 1067 mm.

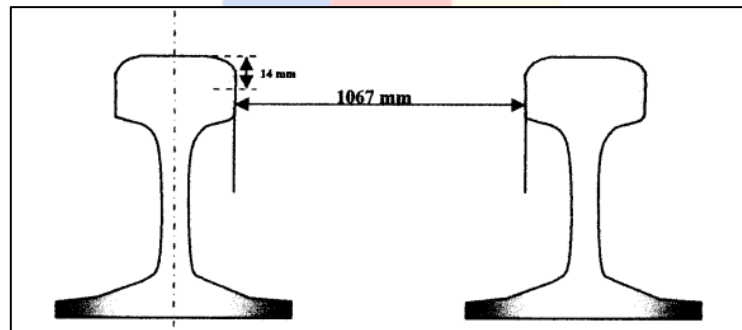
Tabel II.1 Ketetapan Jarak Ruang Bangun

Segmen Jalur	Jalur Lurus
Lintas Bebas	Minimal 2.35 meter di kiri-kanan as jalan rel
Emplasemen	Minimal 1.95 meter di kiri-kanan as jalan rel
Jembatan	2.15 meter di kiri kanan as jalan rel

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

### II.3 Lebar Jalan Rel dan Formasi Badan Jalan

Lebar jalan rel adalah standar jarak minimum dari dua sisi kepala rel, yaitu 1067 mm atau 1435 mm. Toleransi untuk pelebaran jalan rel kereta api adalah -3 dan +3. Berikut adalah gambar lebar jalan rel untuk 1067 mm.



Gambar II.2 Lebar Jalan Rel untuk 1067 mm

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

### II.4 Spesifikasi dan Persyaratan Jembatan Rel Kereta Api

Komponen jembatan terdiri dari struktur bagian atas, bagian bawah, dan pelindungnya. Struktur jembatan rel kereta api terbagi menjadi tiga berdasarkan materialnya, yaitu jembatan baja, jembatan beton, dan jembatan komposit. Berikut adalah tabel dari jembatan baja sendiri yang secara umum terbagi ke dalam empat kelompok berdasarkan tipenya.

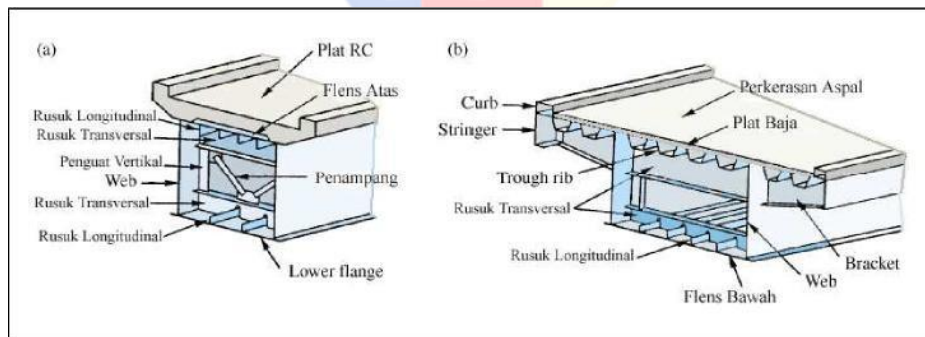
Tabel II.2 Jembatan Baja Berdasarkan Tipenya

Tippe	Gelagar	Rangka
Dinding	Gelagar Dinding	Rangka Dinding
Rasuk	Gelagar Rasuk	Rangka Rasuk

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

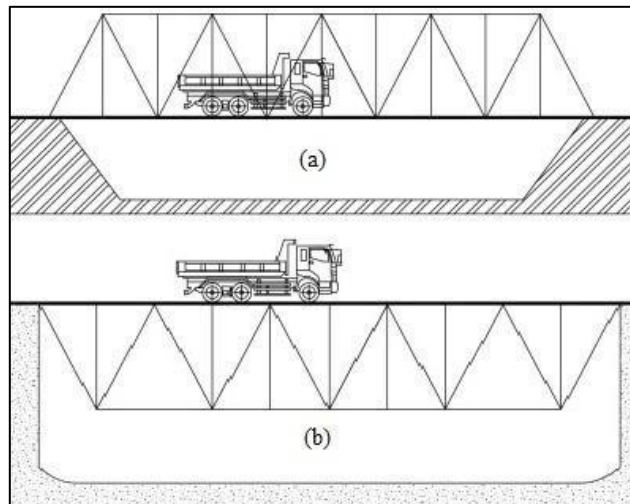
Keterangan

- Gelagar dinding: *girder* atau balok yang letaknya di antara pilar (*abutment*) dengan dinding atau rangkanya yang berada di atas *deck* pada kiri-kanannya.
- Gelagar rasuk: *girder* atau balok yang letaknya di antara pilar (*abutment*) dengan *deck* yang berada di atas rangka atau dindingnya.
- Rangka dinding: jembatan yang terdiri dari rangka-rangka yang saling terhubung dengan sendi dengan dindingnya yang berada di atas rangka pada kiri-kanannya.
- Rangka rasuk: jembatan yang terdiri dari rangka-rangka yang saling terhubung dengan sendi dengan *deck* yang berada di atas dindingnya.



Gambar II.3 Jembatan Gelagar Dinding (a) dan Jembatan Gelagar Rasuk (b)

(sumber: Chen dan Duan, 2000)



Gambar II.4 Jembatan Rangka Dinding (a) dan Jembatan Rangka Rasuk (b)

(sumber: Sharma, Pathak, and Singh 2021)

Dalam perencanaan dan pembangunan jembatan, persyaratan yang harus dipenuhi dari pondasi hingga struktur bangunan atas, yaitu beban gandar, lendutan, stabilitas konstruksi, dan ruang bebas. Beban gandar merupakan beban paling besar yang harus diperhitungkan dan direncanakan berdasarkan klasifikasi jalurnya. Jenis pembebanan lainnya yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan, yaitu beban mati, beban hidup, beban kejut, beban horizontal (beban lateral kereta, beban rem dan traksi, dan beban rel panjang longitudinal), beban angin, beban gempa, dan beban air. Efek beban yang juga harus dipertimbangkan, yaitu perubahan suhu atau temperatur, pemuaian dan penyusutan, dan penurunan atau defleksi.

Lalu, khususnya dalam konstruksi jembatan baja, berikut adalah persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi berdasarkan Permenhub No. 60 Tahun 2012:

- (1) Tegangan (*stress*) dan tegangan lelah (*fatigue*) pada struktur baja harus lebih kecil daripada tegangan ijin;
- (2) tegangan (*stress*) pada baut dan paku keling (*rivet*) harus lebih kecil daripada tegangan ijin, dan;
- (3) tegangan tarik material las minimum sama atau lebih besar daripada material yang disambung.

## II.5 Lajur Lalu Lintas Jembatan Kereta Api

Perencanaan lalu lintas rencana dilakukan berdasarkan tipe jembatan dan jumlah lajur lalu lintas rencana untuk mendapatkan lebar bersih jembatan yang akan direncanakan. Berikut adalah tabel jumlah lajur lalu lintas rencana.

Tabel II.3 Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana

Tipe Jembatan <sup>(1)</sup>	Lebar Bersih Jembatan (mm) <sup>(2)</sup>	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n)
Satu Lajur	$3000 \leq w < 5250$	1
Dua Arah, Tanpa Median	$5250 \leq w < 7500$	2
	$7500 \leq w < 10000$	3
	$10000 \leq w < 12500$	4
	$12500 \leq w < 15250$	5
	$w \geq 15250$	6
Dua Arah, Dengan Median	$5500 \leq w < 8000$	2
	$8250 \leq w < 10750$	3
	$11000 \leq w < 13500$	4
	$13750 \leq w < 16250$	5
	$w \geq 16500$	6
Catatan <sup>(1)</sup> : untuk jembatan tipe lain, instansi berwenang yang menentukan jumlah lajur lalu lintas rencana		
Catatan <sup>(2)</sup> : jarak minimum antara kerb/rintangangan untuk satu arah atau jarak antara kerb/rintangangan/median dan median untuk banyak arah		

(sumber: SNI 1725:2016)

## II.6 Pembebanan Jembatan Rel Kereta Api

Terdapat empat jenis pembebanan yang terjadi pada jembatan rel kereta api, yaitu beban mati, beban hidup, beban kejut, dan beban horizontal. Kereta api sendiri memberikan aksi pada jembatan dalam arah longitudinal, lateral, dan vertikal.

### 1. Beban mati struktur atau berat sendiri (DL)

Berdasarkan SNI 1727:2013 pasal 3.1.1, beban mati adalah beban dari berat bagian-bagian bangunan yang sifatnya tetap, termasuk bagian tambahannya,

material-material, hingga perlengkapan yang bagiannya tidak terpisahkan dari bangunan tersebut. Berikut adalah tabel berat jenis bahan yang umumnya digunakan untuk menghitung beban mati dalam konstruksi jembatan.

Tabel II.4 Berat Jenis Bahan

Bahan	Berat Isi (kN/m <sup>3</sup> )	Kerapatan Massa (kg/m <sup>3</sup> )
Lapisan permukaan beraspal	22,0	2245
Besi tuang	71,0	7240
Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1755
Kerikil dipadatkan	18,8 – 22,7	1920 – 2315
Beton aspal	22,0	2245
Beton ringan	12,25 – 19,6	1250 – 2000
Beton $f_c < 35$ Mpa	22,0 – 25,0	2320
Beton $35 < f_c < 105$ Mpa	$22 + 0,022 f_c$	$2240 + 2,29 f_c$
Baja	78,5	7850
Kayu	7,8	800
Kayu keras	11,0	1125

(Sumber: SNI 1725:2016)

Menurut SNI 1725:2016, beban mati atau berat sendiri memiliki faktor beban yang akan digunakan untuk perhitungan pada kombinasi pembebanan dan dijabarkan pada tabel di bawah ini.

Tabel II.5 Faktor Beban untuk Berat Sendiri (MS)

Tipe Beban	Faktor Beban ( $\gamma_{MS}$ )			
	Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{MS}^S$ )		Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{MS}^U$ )	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton dicor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

(sumber: SNI 1725:2016)

Dalam memperhitungkan baut, pelat buhul, pengaku, dan komponen pelengkap lainnya pada struktur baja biasanya akan dihitung sebesar 10% – 15% dari berat superstruktur baja. Beban mati konstruksi sementara yang ditopang jembatan juga perlu diperhitungkan dan dipertimbangkan dalam desain berdasarkan AREMA 2008.

2. Beban mati tambahan (DL')

Beban mati tambahan atau beban mati utilitas merupakan beban yang sifatnya tetap dari elemen yang bersifat non-struktural pada jembatan dan besar beban dapat berubah seiring berjalannya umur jembatan. Berikut adalah tabel faktor untuk beban mati tambahan berdasarkan SNI 1725:2016.

Tabel II.6 Faktor Beban Mati Tambahan

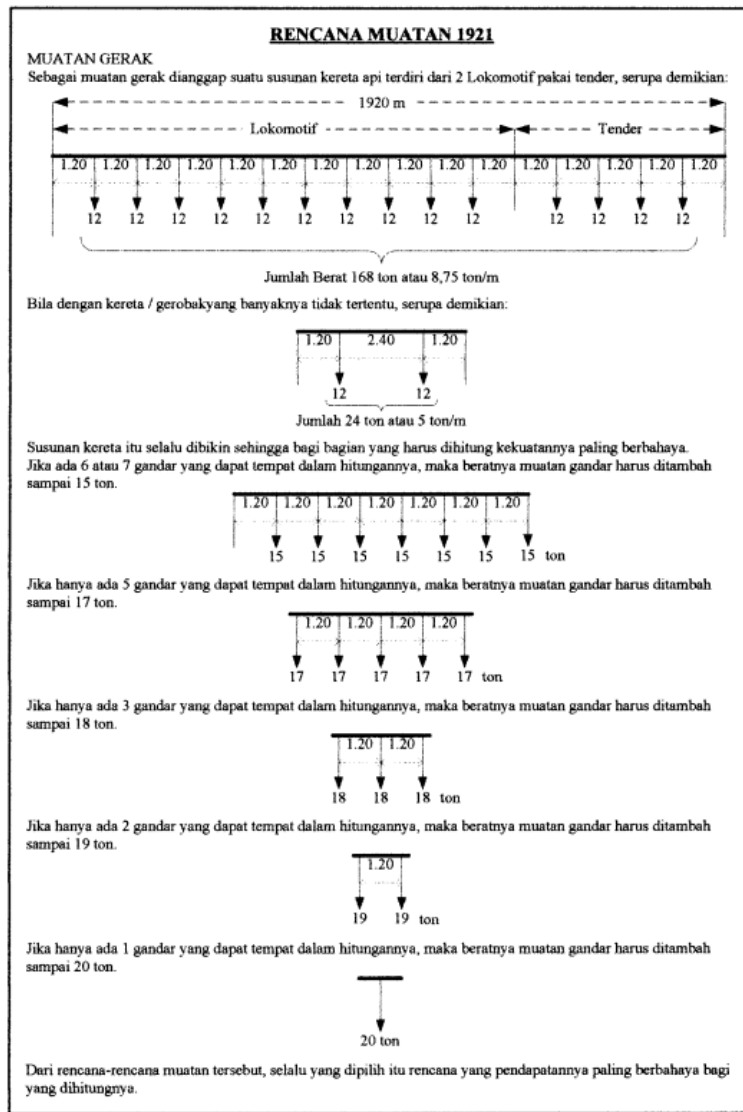
Tipe Beban	Faktor Beban ( $\gamma_{MA}$ )			
	Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{MA}^S$ )		Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{MA}^U$ )	
	Keadaan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 <sup>(1)</sup>	2,00	0,70
	Khusus (Terawasi)	1,00	1,40	0,80
Catatan <sup>(1)</sup> : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas				

(Sumber: SNI 1725:2016)

3. Beban hidup (LL)

Berdasarkan SNI 1727:2013 pasal 4.1, beban hidup adalah beban yang di mana sifatnya berubah-ubah atau bergerak (transien), serta bukan merupakan bagian dari bangunan itu sendiri. Beban hidup juga tidak termasuk dari beban dari lingkungan atau eksternal. Beban gandar merupakan beban hidup yang paling besar untuk merencanakan jembatan kereta api. Beban gandar adalah beban yang ditransfer ke rel kereta api dari sumbu atau poros pada roda kereta api. Beban gandar yang lebih dari 18 ton, rencana muatan disesuaikan dengan kebutuhan tekanan gandar. Apabila beban gandar sampai 18 ton, maka dapat menggunakan skema rencana muatan 1921 atau RM 21 seperti gambar berikut ini.





Gambar II.5 Skema Pembebanan Gandar Rencana Muatan 1921

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

Rencana muatan 1921 atau RM 21 merupakan pedoman yang berisi tentang mempertimbangkan antara jumlah, jarak, dan tekanan gandar pada kereta api. Semakin banyak jumlah gandar pada kereta api, maka tekanan pada 1 titik gandar akan lebih besar dibandingkan gandar pada kereta api yang lebih sedikit. Untuk jarak gandar sendiri pada kenyataan atau *real*-nya tidak 100% serupa dengan ketetapan. Berdasarkan hasil perhitungan dan riset (Tri Muspitasari, Evaluasi

Peraturan Pembebanan Gandar Kereta Api di Pulau Jawa Terhadap Kondisi Aktual, 2017), gaya dalam maksimum dari kereta api yang aktual lebih kecil sekitar 30% daripada gaya dalam maksimum dari ketentuan RM 21. Dapat disimpulkan, peraturan beban gandar RM 21 masih dapat digunakan sebagai standar desain untuk beban hidup jembatan kereta api.

4. Beban kejut (I)

Beban kejut adalah beban yang di mana gaya secara tiba-tiba diberikan dari suatu benda yang tiba-tiba berakselerasi atau melambat. Penentuan beban kejut sangat penting karena berhubungan dengan situasi yang menentukan keselamatan. Beban kejut dihitung melalui beban kereta yang dikalikan dengan faktor *i*, khususnya untuk rel yang bersentuhan langsung pada baja, maka rumusnya adalah sebagai berikut:

$$i = 0.3 + \frac{25}{50+L} \dots\dots\dots(2-1)$$

Keterangan:

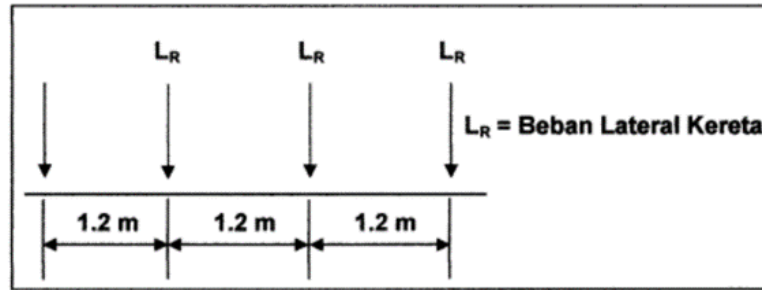
- i* = faktor kejut
- L* = panjang bentang (m)

5. Beban horizontal

Beban horizontal terdiri dari beban lateral kereta, beban pengereman dan traksi, serta beban rel panjang longitudinal yang diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012.

a. Beban lateral kereta (N)

Beban lateral kereta adalah beban yang bekerja di bagian atas, serta arahnya tegak lurus dari rel kereta yang besarnya sekitar 15% hingga 20% dari beban gandar. Beban ini memungkinkan terjadinya pergeseran apabila rel kereta tidak mampu menahannya.



Gambar II.6 Beban Lateral Kereta

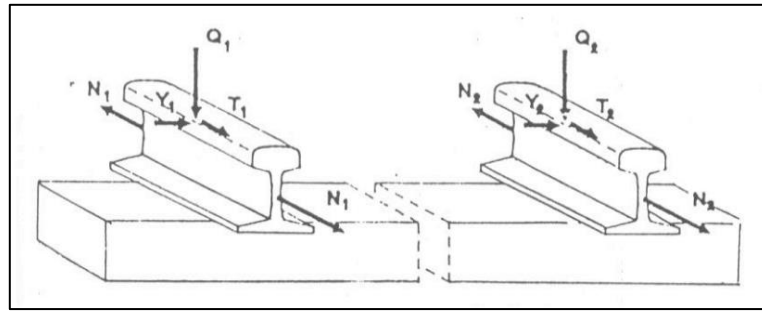
(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

b. Beban pengereman dan traksi (LF)

Beban pengereman berkaitan dengan tekanan yang terjadi pada ban dengan rel kereta api, apabila beban pengereman semakin besar, maka tekanannya juga akan semakin besar. Beban pengereman adalah beban dari gaya gesek maksimum dari dua benda di permukaannya, yaitu ban dan rel kereta api sehingga tidak menyebabkan selip atau tergelincir. Sedangkan, beban traksi adalah beban yang dipengaruhi oleh mekanika gerak traksi. Beban ini masing-masing sebesar 25% dari beban kereta yang bekerja secara longitudinal, tepatnya pada pusat gaya berat kereta kepada rel.

c. Beban rel panjang longitudinal (CWR)

Beban dari rel yang diteruskan ke balok melintang pada dasarnya sebesar 10 kN/m dengan maksimum 2000 kN. Beban rel panjang longitudinal berasal dari beban statis dan dinamis. Beban statisnya meliputi berat sendiri dari rel kereta api, bantalan, dan beban struktur lainnya, sedangkan beban dinamisnya berasal dari beban kereta api yang berjalan diatas rel.



Gambar II.7 Gaya-gaya yang Bekerja pada Rel Kereta Api

(Sumber: Saiful Haq, 2015)

Keterangan:

Gaya vertikal = Q

Gaya lateral = Y

Gaya longitudinal = T

Gaya akibat perubahan suhu (termasuk gaya longitudinal) = N

## II.7 Pembebanan Eksternal Jembatan Rel Kereta Api

Terdapat dua jenis pembebanan yang terjadi pada jembatan rel kereta api, yaitu beban angin dan beban gempa.

### 1. Beban angin

#### a) Beban angin pada struktur (W)

Beban angin adalah beban-beban yang bekerja secara horizontal pada sebuah jembatan akibat selisih dalam tekanan udara dan bekerja secara transien. Untuk perhitungan beban angin, kecepatan dasar yang direncanakan sebesar 90 hingga 126 km/jam dan diasumsikan terdistribusi merata di permukaan yang terkena angin. Apabila tinggi jembatan melebihi 10 meter di atas permukaan tanah maupun air, berikut adalah rumus untuk mencari kecepatan angin rencananya ( $V_{DZ}$ ) berdasarkan SNI 1725 tahun 2016 pasal 9.6.1.

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

Keterangan

$V_{DZ}$  = kecepatan angin yang direncanakan pada elevasi rencana, yaitu  $Z$  (km/jam)

$V_{10}$  = kecepatan angin yang berada pada elevasi 10000 mm dari permukaan tanah atau air rencana (km/jam)

$V_B$  = kecepatan angin yang direncanakan sebesar 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm

$Z$  = struktur yang elevasinya diukur dari permukaan tanah atau air ketika beban angin dihitung dan  $Z$  harus lebih besar dari 10000 mm

$V_o$  = kecepatan dari gesekan angin

$Z_o$  = panjang dari gesekan pada hulu jembatan

Tabel II.7 Nilai  $V_o$  dan  $Z_o$  sesuai dengan Kondisi

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
$V_o$	13,2	17,6	19,3
$Z_o$	70	1000	2500

(Sumber: SNI 1725:2016)

Catatan: untuk mencari  $V_{10}$  dapat menggunakan grafik kecepatan angin dasar pada berbagai periode ulang, lokasi jembatan disurvei kecepatan anginnya, maupun asumsi  $V_{10} = V_B$ .

Setelah mencari kecepatan angin yang direncanakan pada elevasi rencana, maka dapat menentukan tekanan angin rencana yang bekerja pada struktur, dengan asumsi bahwa arah angin rencana horizontal.

$$P_D = P_B \left( \frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \dots\dots\dots(2-3)$$

Keterangan:

$P_D$  = tekanan angin rencana yang bekerja pada struktur (MPa)

$P_B$  = tekanan angin dasar (MPa)

Tabel II.8 Tekanan Angin Dasar,  $P_B$

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)

Catatan: pada bidang tekan, gaya total beban angin tidak dapat kurang dari 4,4 kPa dan bidang hisap sebesar 2,2 kPa untuk struktur rangka dan pelengkung. Sementara, balok atau gelagar gaya total beban angin pada bidang tekan dan hisapnya tidak kurang dari 4,4 kPa.

Apabila beban angin yang bekerja tidak dalam arah horizontal, maka tegangan angin dasar harus dihitung berdasarkan tabel di bawah ini sesuai dengan sudut serang. Arah sudut ditentukan berdasarkan tegak lurus terhadap arah dari longitudinal.

Tabel II.9 Berbagai Sudut Serang untuk Tekanan Angin Dasar ( $P_b$ )

Sudut serang	Rangka, kolom, dan pelengkung		Gelagar	
	Beban Lateral	Beban Longitudinal	Beban Lateral	Beban Longitudinal
	MPa	MPa	MPa	MPa
0	0,0036	0,0000	0,0024	0,0000
15	0,0034	0,0006	0,0021	0,0003
30	0,0031	0,0013	0,0020	0,0006
45	0,0023	0,0020	0,0016	0,0008
60	0,0011	0,0024	0,0008	0,0009

(Sumber: SNI 1725:2016)

b) Beban angin pada kendaraan ( $W'$ )

Beban angin juga terdapat pada kendaraan yang melewati jembatan, di mana jembatan dapat menopang tekanan angin dari kendaraan yang bersifat menerus sebesar 1,46 N/mm. Tekanan angin tersebut tegak lurus, serta bekerja setinggi 1,8 meter di atas permukaan jalan. Terdapat juga arah dari sudut serang ditentukan berdasarkan tegak lurus terhadap arah dari permukaan kendaraan.

Tabel II.10 Berbagai Sudut Serang 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)

Apabila dalam Keadaan Batas Kuat III dan Layan IV sama sekali tidak termasuk angin pada kendaraan, maka jembatan juga harus dihitung gaya angin vertikal ke atasnya, yaitu sebesar  $9,6 \times 10^{-4}$  MPa yang dikali dengan lebar jembatannya

Berdasarkan dari Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 pada 3.2.1, nilai dari beban angin ada dua:

- a) Pada area proyeksi vertikal jembatan tanpa di atasnya ada kereta, beban angin sebesar  $3 \text{ kN/m}^2$ , sedangkan pada area proyeksi rangka batang yang searah dengan datangnya angin nilainya  $2 \text{ kN/m}^2$  yang tidak termasuk area sistem lantai.
- b) Pada area kereta dan jembatan, nilainya sebesar  $1.5 \text{ kN/m}^2$ , sedangkan area proyeksi rangka batang yang searah pada datangnya angin sebesar  $0.8 \text{ kN/m}^2$ .

## 2. Beban gempa (EQ)

Beban gempa adalah beban yang bekerja pada gedung, serta mengikuti pengaruh dari pergerakan tanah karena gempa tersebut, biasanya disebut beban statik ekuivalen. Namun, beban gempa lebih berpengaruh pada struktur bawah jembatan.

### II.8 Kombinasi Pembebanan Jembatan Kereta Api

Perhitungan ini diambil dari hasil kombinasi pembebanan yang paling besar yang terdiri dari beban vertikal, beban horizontal, dan momen guling. Berikut adalah kombinasi pembebanan yang terjadi pada struktur jembatan berdasarkan tabel dari SNI 1725:2016 Pasal 6.1 Tabel 1.

Tabel II.11 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW <sub>s</sub>	EW <sub>L</sub>	BF	EU <sub>n</sub>	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	$\gamma_P$	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Kuat II	$\gamma_P$	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Kuat III	$\gamma_P$	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Kuat IV	$\gamma_P$	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	$\gamma_P$	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Ekstrem I	$\gamma_P$	$\gamma_{EQ}$	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00	-	-
Ekstrem II	$\gamma_P$	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,00	1,00
Daya layan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Daya layan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-



Daya layan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Daya layan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Catatan: $-\gamma_P$ dapat berupa $\gamma_{MS}, \gamma_{MA}, \gamma_{TA}, \gamma_{PR}, \gamma_{PL}, \gamma_{SH}$ tergantung beban yang ditinjau $-\gamma_{EQ}$ adalah faktor beban hidup kondisi gempa												

(sumber: SNI 1725:2016)

Keterangan:

a) Beban Permanen, beban yang bersifat tetap

MS = Beban mati pada komponen bersifat struktural dan non-struktural

MA = Beban mati tambahan pada perkerasan dan utilitas

TA = Tekanan tanah yang menyebabkan terjadi gaya horizontal

PL = Gaya-gaya yang terjadi akibat pelaksanaan pada struktur jembatan

PR = Prategang

b) Beban Transien, beban yang bersifat tidak tetap

SH = Gaya yang terjadi akibat susut atau rangkai

TB = Gaya yang terjadi akibat pengereman

TR = Gaya sentrifugal

TC = Gaya yang terjadi karena tumbukan kendaraan

TV = Gaya yang terjadi karena tumbukan kapal

EQ = Gaya akibat gempa

BF = Gaya akibat friksi

TD = Beban pada lajur "D"

TT = Beban pada truk "T"

TP = Beban dari pejalan kaki

SE = Beban yang terjadi akibat penurunan

ET = Gaya yang terjadi akibat temperatur gradien

$EU_n$  = Gaya yang terjadi akibat temperatur seragam

$EF$  = Gaya apung

$EW_s$  = Beban angin yang terjadi pada struktur

$EW_L$  = Beban angin yang terjadi pada kendaraan

$EU$  = Beban arus dan hanyutan

Berikut adalah penjelasan dari masing-masing keadaan batas berdasarkan SNI 1725:2016

1. Kuat I : Kombinasi pembebanan dalam keadaan normal memperhitungkan gaya-gaya yang terjadi pada jembatan dan dikali dengan faktor beban yang sesuai, serta tidak termasuk beban angin.
2. Kuat II : Kombinasi pembebanan yang memikul beban kendaraan khusus terkait dengan penggunaan jembatan berdasarkan ketentuan pemilik, serta tidak termasuk beban angin.
3. Kuat III : Kombinasi pembebanan yang termasuk beban angin dengan kecepatan 90 sampai 126 km/jam yang mengenai jembatan.
4. Kuat IV : Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan beban hidup yang besar dengan kemungkinan terdapat rasio beban mati.
5. Kuat V : Kombinasi pembebanan yang termasuk beban angin dengan kecepatan 90 sampai 126 km/jam dan berkaitan dengan operasional normal jembatan.
6. Ekstrem I : Kombinasi pembebanan pada gempa yang sedang berlangsung dengan mempertimbangkan bekerjanya beban hidup berdasarkan faktor beban hidup  $\gamma_{EQ}$  harus ditentukan sesuai kepentingan jembatan.
7. Ekstrem II : Kombinasi pembebanan yang mengurangi beban hidup dengan beban akibat tumbukan kapal, kendaraan, dan beban hidrolika seperti banjir, serta tidak termasuk pembebanan akibat tumbukan kendaraan.
8. Layan I : Kombinasi pembebanan yang termasuk beban angin dengan kecepatan 90 sampai 126 km/jam dan semua beban yang berkaitan dengan operasional jembatan. Kombinasi ini juga biasa digunakan untuk mengontrol lendutan, khususnya pada gorong-gorong baja, pelat pelapis terowongan, dan pipa

termoplastik. Selain itu, kombinasi ini dapat mengontrol lebar pada retaknya beton bertulang, menganalisa tegangan tarik pada penampang melintang jembatan beton segmental, serta untuk investigasi stabilitas lereng.

9. Layan II : Kombinasi pembebanan akibat beban kendaraan untuk mencegah terjadinya leleh pada struktur baja, serta selip pada sambungan.
10. Layan III : Kombinasi pembebanan dalam arah memanjang jembatan beton pratekan untuk menghitung tegangan tarik agar besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental dapat dikontrol.
11. Layan IV : Kombinasi pembebanan pada kolom beton praktekan untuk menghitung tegangan tarik agar besarnya retak dapat dikontrol.
12. Fatik : Kombinasi pembebanan yang induksi bebannya dengan waktu tak terbatas sesuai dengan fatik dan fraktur, serta memengaruhi umur fatik.

## II.9 Perhitungan Efek dari Pembebanan Jembatan Kereta Api

Terdapat efek-efek dari pembebanan yang terjadi pada jembatan rel kereta api, yaitu memengaruhi deformasi, lendutan, stabilitas, dan tinggi jagaan.

### 1. Deformasi akibat perubahan temperatur

Deformasi yang terjadi harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan kereta api. Deformasi yang terjadi pada jembatan salah satunya disebabkan karena adanya perubahan temperatur di setiap waktunya yang menyebabkan pertambahan panjang. Perencanaan ini dilakukan guna dalam memasang *expansion joint* atau sambungan siar muai supaya tidak terjadi perubahan dan meminimalisir terjadinya gerakan pada jembatan sehingga aman dilalui. Berikut adalah tabel temperatur jembatan rata-rata minimum dan maksimum yang digunakan untuk menghitung pertambahan panjang baja akibat perbedaan suhu.

Tabel II.12 Temperatur Jembatan Rata-rata Minimum dan Maksimum

Tipe bangunan atas	Temperatur jembatan rata-rata minimum <sup>(1)</sup>	Temperatur jembatan rata-rata maksimum
--------------------	--	--

Lantai beton di atas gelagar atau boks beton	15°C	40°C
Lantai beton di atas gelagar, boks, atau rangka baja	15°C	40°C
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks atau rangka baja	15°C	45°C

(sumber: SNI 1725:2016)

Berikut adalah cara untuk menghitung besar simpangan yang nilai  $T_{maks}$  dan  $T_{min}$  diambil dari nilai rata-rata minimum dan maksimum temperatur jembatan pada tabel di atas.

$$\Delta_T = \alpha L(T_{maks} - T_{min}) \dots \dots \dots (2-4)$$

Keterangan:

L = panjang jembatan (mm)

$\alpha$  = koefisien muai temperatur (mm/mm/°C)

Tabel II.13 Nilai Koefisien Muai dan Modulus Elastisitas pada Bahan

Bahan	Koefisien perpanjangan akibat suhu ( $\alpha$ )	Modulus Elastisitas (MPa)
Baja	$12 \times 10^{-6}$ per °C	200.000
Beton:		
Kuat tekan < 30 MPa	$10 \times 10^{-6}$ per °C	$4700\sqrt{f'c}$
Kuat tekan > 30 MPa	$11 \times 10^{-6}$ per °C	$4700\sqrt{f'c}$

(sumber: SNI 1725:2016)

## 2. Defleksi atau lendutan

Defleksi atau lendutan merupakan perubahan bentuk dari struktur pada arah y karena menerima gaya vertikal pada batang. Defleksi diukur dari batang awal dalam posisi netral, baik dari sebelum hingga setelah terjadi pembebanan. Besarnya penyimpangan yang tidak boleh lebih dari persyaratan atau standar koefisien yang

telah ditetapkan. Berikut adalah tabel koefisien maksimum dari defleksi jembatan baja.

Tabel II.14 Koefisien Maksimum Defleksi dari Jembatan Baja

Jenis	Gelagar			Rangka Batang
	L(m)	L < 50	L ≥ 50	
Jenis Kereta		L < 50	L ≥ 50	Seluruh Rangka
Lokomotif		L / 800	L / 700	L / 1000
Kereta Listrik dan/atau Kereta	V (km/h)	V < 100	L / 700	
		100 < V ≤ 130	L / 800	L / 700
		100 < V ≤ 130	L / 1100	L / 900

(Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012)

### 3. Stabilitas

Salah satu syarat bangunan yang memenuhi syarat dan sesuai fungsi dengan memiliki kestabilan struktur yang baik. Stabilitas diperhitungkan dari jumlah pembebanan hingga kombinasi pembebanan, khususnya untuk konstruksi jembatan bagian atas dengan menggunakan satu diantara dua metode: metode desain tegangan ijin (*Allowable Stress Design/ASD*) atau metode faktor beban (*Limit State Design/LSD*).

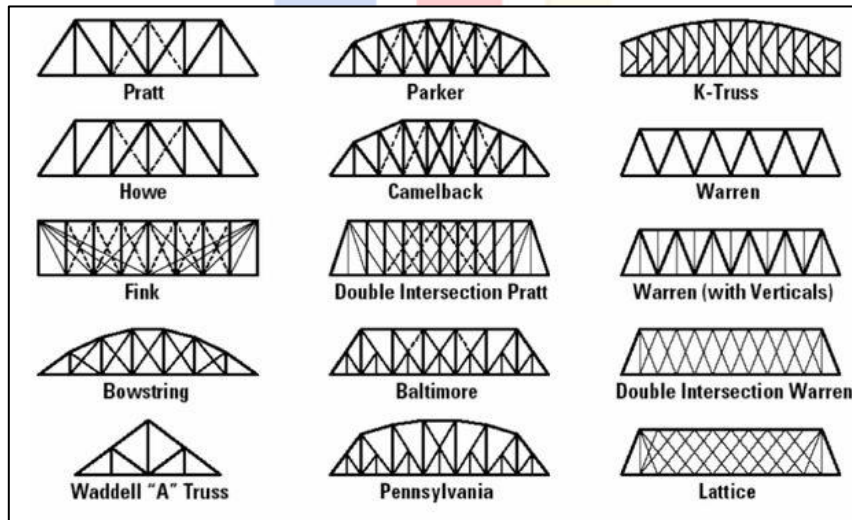
Berdasarkan peraturan dari *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA) tahun 2008, untuk mencegah ketidakstabilan dari beban angin dan beban lateral, maka jarak balok melintang harus lebih besar dari  $\frac{1}{20}$  dari panjang bentang jembatan, sedangkan jarak bentang *deck* harus lebih besar dari  $\frac{1}{15}$  dari panjang bentang jembatan. Jarak antara balok, *stringers*, atau gelagar tidak boleh kurang dari 6,5 kaki atau 19 meter.

#### 4. Tinggi Jagaan atau *Free Board*

Tinggi jagaan diukur pada kondisi debit rencana, yaitu jarak yang dihitung dari permukaan air hingga ke puncak saluran yang fungsinya untuk mencegah naiknya air ke tepian sungai. Tinggi jagaan minimum 1 meter dari jembatan bawah hingga muka air banjir yang terencanakan.

### II.10 Struktur Rangka Batang

Struktur rangka batang merupakan rangkaian batang yang berbentuk segitiga dan dapat terbuat dari berbagai material, seperti kayu, baja, dan lainnya. Bentuk segitiga merupakan bentuk yang sangat stabil dan tidak mudah berubah-ubah. Sambungan pada struktur rangka batang, khususnya baja berada pada titik buhul yang dianggap sebagai sendi karena sambungannya tetap dan stabil, biasanya penyambungan menggunakan baut, paku keling atau rivet, hingga pengelasan. Berikut adalah gambar jenis-jenis rangka batang untuk jembatan.



Gambar II.8 Jenis Jembatan Rangka Batang

(Sumber: Femia, 2013)

*Pratt Truss* merupakan rangka batang yang dirancang untuk menahan gaya tekan oleh batang vertikal dan gaya tarik oleh batang diagonal. *Pratt Truss* memiliki kesamaan dengan rangka batang *Howe Truss*, di mana arah batang diagonalnya

menahan gaya tekan dan batang vertikal menahan gaya tarik (SkyCiv, 2023). Berikut adalah kelebihan dari rangka batang yang menggunakan *Pratt Truss* atau *Howe Truss*:

1. Desain ini menyebabkan biaya menjadi lebih efisien karena mengurangi penggunaan batang diagonal;
2. desainnya sederhana sehingga banyak digunakan dalam aplikasi jembatan.

Namun, terdapat kekurangan dari rangka batang *Pratt Truss* atau *Howe Truss*, yaitu hanya efektif menahan beban-beban pada arah vertikal saja.

*K Truss* merupakan bentuk rangka batang yang lebih kompleks dari *Pratt Truss*. Perbedaannya adalah pada batang vertikal yang lebih pendek sehingga memperkecil kemungkinan terjadinya *buckling* akibat gaya tekan dan termasuk jenis rangka batang yang kuat (SkyCiv, 2023). Berikut adalah kelebihan dari rangka batang yang menggunakan *K Truss*:

1. Memperkecil gaya tekan *ultimate* pada batang vertikal;
2. Dapat menjadi hemat biaya apabila didesain seefisien mungkin.

Namun, terdapat kekurangan dari rangka batang *K Truss*, yaitu desainnya yang sedikit lebih kompleks karena terdapat batang diagonal tambahan yang meningkatkan kesulitan dalam proses konstruksi.

*Parker Truss* merupakan rangka batang yang diciptakan oleh Charles H. Parker pada 1870 karena perbedaannya dengan memodifikasi batang tepi atas rangka batang menjadi batang diagonal. *Parker Truss* memiliki kesamaan dengan *Camelback Truss* secara bentuk dan kelebihan dari *Parker Truss* dan *Camelback Truss* adalah batang tepi atas yang dibuat diagonal menyebabkan kebutuhan baja yang lebih sedikit sehingga biaya lebih murah, tanpa mengurangi kekuatan dari batang itu sendiri (Luna, 2023). Namun, karena batang tersebut dibuat diagonal, hal tersebut juga menjadi kelemahan dari pembangunan jembatan ini karena pembangunannya menjadi lebih sulit.

*Pennsylvania Truss* merupakan variasi dari *Pratt Truss* yang batang tepi atasnya berbentuk poligon dan panelnya dibagi beberapa bagian dengan *tie* dan *strut*.

Kelebihan dari jenis rangka batang ini adalah dapat mendistribusikan beban-beban yang diterima secara merata ke batang-batang dan menahan beban sekunder sehingga cocok untuk jembatan bentang panjang. Namun, karena batang tersebut dibuat diagonal dan tambahan *tie-strut*, hal tersebut juga menjadi kelemahan dari pembangunan jembatan ini karena pembangunannya menjadi lebih sulit (North Carolina Department of Transportation, 2020).

*Warren Truss* merupakan rangka batang yang sangat populer digunakan saat ini dengan bentuknya yang segitiga sama sisi. Batang diagonal rangka batang ini dapat menahan gaya aksial tarik maupun tekan, apabila terdapat batang vertikal diantara batang diagonal tersebut, maka batang tersebut dapat menambah kekakuan dari rangka batang (North Carolina Department of Transportation, 2020). Berikut adalah kelebihan dari rangka batang yang menggunakan *Warren Truss*:

1. Dapat mendistribusikan beban-beban dengan cukup merata ke masing-masing batang;
2. Desain jembatan yang sederhana sehingga biaya murah;

Namun, terdapat kekurangan dari rangka batang yang menggunakan *Warren Truss*:

1. Tidak cocok digunakan untuk menopang beban yang terpusat;
2. Konstruksi yang sedikit rumit karena lebih dominan batang diagonal dibandingkan jenis rangka batang lainnya.

Setelah memaparkan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing jenis rangka batang, proyek ini memakai jenis rangka batang *Warren Truss* karena dari segi desain yang sederhana. Walaupun sedikit lebih rumit konstruksinya karena lebih dominan batang diagonal, namun karena lebih sedikit batang yang dipasang, maka akan lebih mempercepat waktu pembangunan dan menghemat biaya. Selain itu, karena menahan beban bergerak dari kereta api dan bukan beban terpusat, *Warren Truss* mampu dan dirancang untuk menahan beban dan membaginya secara merata ke setiap batang.



Terdapat gaya aksial yang dipikul dan ditransfer dari struktur rangka batang, baik gaya tarik (*tension*) atau gaya tekan (*compression*). Selain itu, ada tiga jenis konstruksi rangka batang, yaitu rangka batang tunggal, rangka batang ganda, dan rangka batang tersusun. Khususnya pada struktur rangka batang tunggal, setiap batang yang menyusunnya memiliki kedudukan yang setara. Metode-metode yang dapat digunakan untuk menganalisis rangka batang:

1. Metode Grafis: Cremona, Culman, dan Williot-Mohr;
2. Metode Analitis: Titik Buhul, Ritter, dan Unit Load.

Terdapat struktur rangka batang stabil dan tidak stabil. Struktur rangka batang yang stabil memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$m \geq 2j - r \dots\dots\dots(2-5)$$

Keterangan:

m = jumlah batang

j = jumlah buhul

r = jumlah reaksi tumpuan



## II.11 Garis Pengaruh

Garis pengaruh atau disebut dengan *influence line* didefinisikan sebagai diagram yang ordinatnya menunjukkan variasi besar suatu respon dari struktur akibat beban satuan yang bergerak di sepanjang bentang. Respons struktur yang di sini dapat berupa reaksi perletakan dan gaya-gaya dalam (momen, gaya geser, dan gaya normal). Garis pengaruh diperlukan dalam mendesain jembatan kereta api karena bebannya merupakan beban dinamis atau bergerak disepanjang jembatan. Untuk menjelaskan konsep mengenai garis pengaruh, maka di bawah ini akan dibahas mengenai garis pengaruh pada balok sederhana dan rangka batang sederhana.

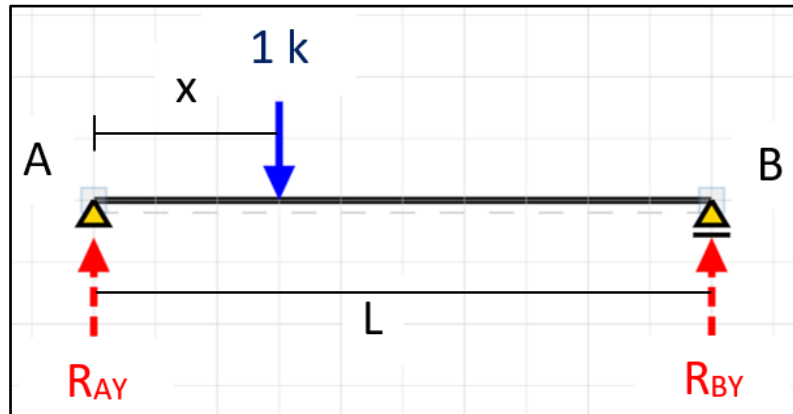
### II.11.1 Garis Pengaruh pada Balok

Respon struktur yang mungkin terjadi pada balok adalah reaksi-reaksi perletakan dan gaya-gaya dalam (momen dan gaya geser). Garis pengaruh pada balok

merupakan dasar untuk mengenal dan memahami bagaimana cara menghitung garis pengaruh pada reaksi perletakan dan juga gaya-gaya dalamnya.

### II.11.2 Garis Pengaruh Reaksi Perletakan pada Balok

Gaya reaksi perletakan yang dihasilkan pada satu titik dengan tambahan beban vertikal ke bawah  $P = 1$  yang dapat bergerak dari satu ujung ke ujung lainnya. Gambar 2.7 adalah definisi dari garis pengaruh yang disajikan secara visual.



Gambar II.9 Skema Garis Pengaruh Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

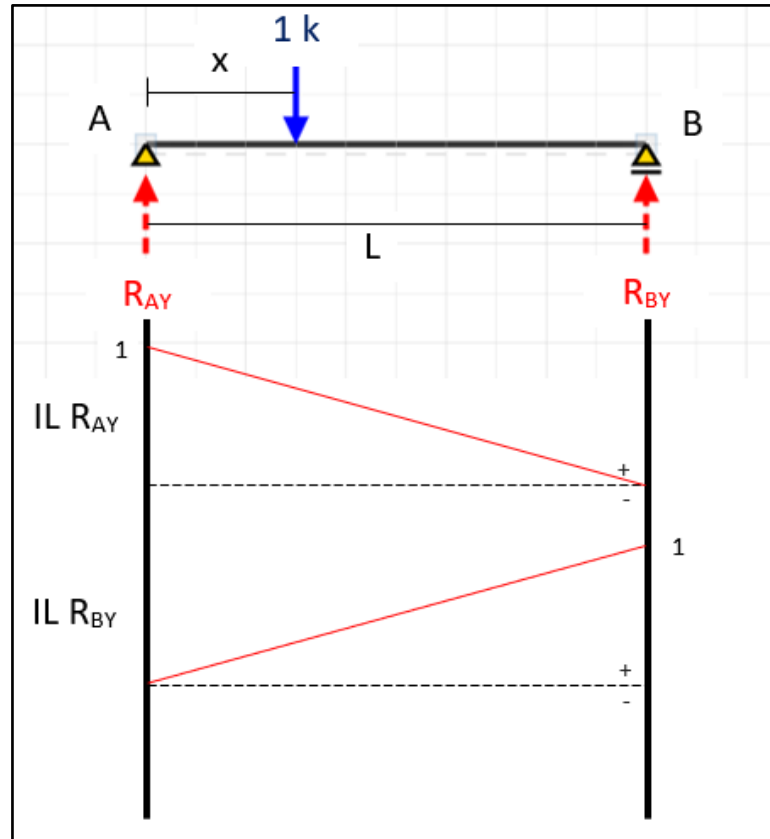
Terdapat gaya vertikal  $R_{AY}$  dan  $R_{BY}$  yang akan dicari. Berikut adalah rumus untuk mencari  $R_{AY}$  dan  $R_{BY}$  pada balok:

$$\begin{aligned} \Sigma M_B &= 0 \\ -P \cdot (L - x) + R_{AY} \cdot L &= 0 \\ R_{AY} &= 1 - \frac{x}{L} \dots \dots \dots (2-6) \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} \Sigma M_A &= 0 \\ P \cdot x - R_{BY} \cdot L &= 0 \\ R_{BY} &= \frac{x}{L} \dots \dots \dots (2-5) \end{aligned}$$

Berdasarkan rumus di atas, apabila beban vertikal ke bawah  $P = 1$  berada tepat di titik A, maka  $R_{AY} = 1$  dan  $R_{BY} = 0$ . Apabila beban vertikal ke bawah  $P = 1$  berada tepat di titik B, maka  $R_{AY} = 0$  dan  $R_{BY} = 1$ . Berikut adalah gambar diagram garis pengaruh ketika  $P$  berada di titik A atau titik B.

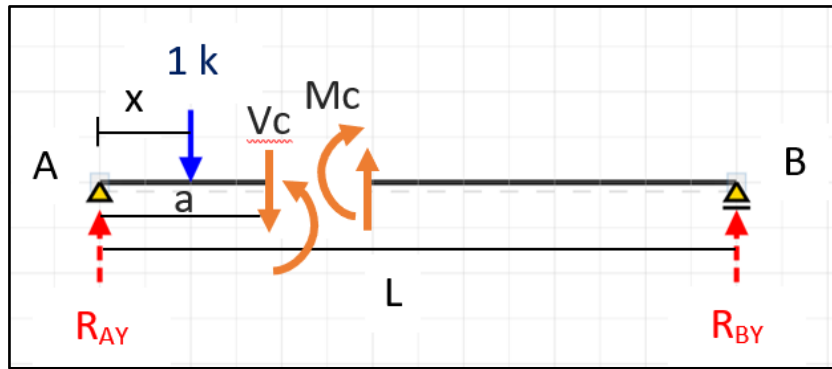


Gambar II.10 Diagram Garis Pengaruh Ray dan Rby Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

### II.11.3 Garis Pengaruh Gaya-Gaya Dalam pada Balok

Jika ada sebuah titik, misalnya C, lalu ingin menganalisa garis pengaruh untuk gaya geser dan momen pada balok, di mana beban vertikal ke bawah  $P = 1$  dapat berada di kiri dan kanan titik C, maka gaya geser dan momen harus dicari berdasarkan beban  $P$  di sisi kiri dan kanan. Berikut adalah perhitungan rumus cara mencari gaya geser dan momen ketika beban  $P$  berada di sisi kiri dan kanan.



Gambar II.11 Diagram Gaya Dalam Balok A - B Ketika P di Sisi Kiri C

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Gaya geser: P ketika di sisi kiri C (perhitungan memakai potongan kiri):

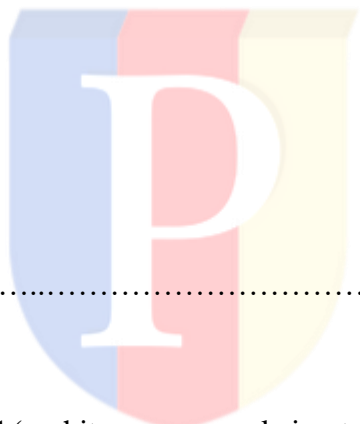
$$\Sigma F_Y = 0$$

$$\Sigma F_Y = R_{AY} - P - V_C$$

$$V_C = R_{AY} - P$$

$$V_C = 1 - \frac{x}{L} - 1$$

$$V_C = -\frac{x}{L} = -R_{BY} \dots\dots\dots(2-7)$$



Momen: P ketika di sisi kiri C (perhitungan memakai potongan kiri):

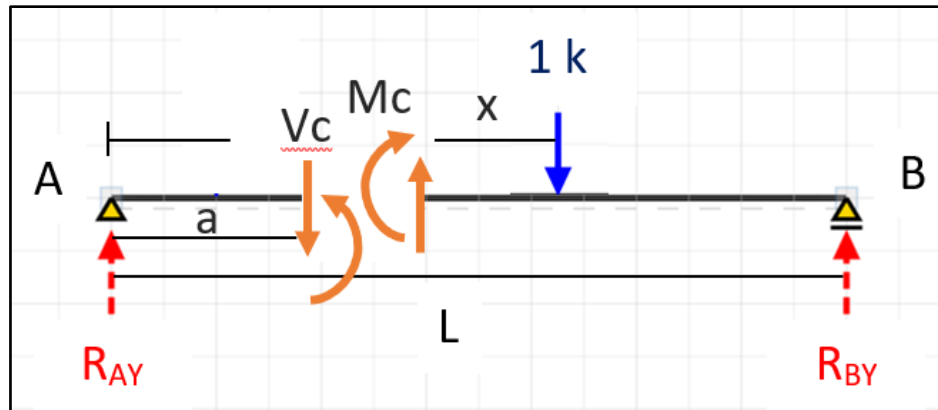
$$\Sigma M_C = 0$$

$$\Sigma M_C = M_C + P(a - x) - R_{AY} \cdot a$$

$$M_C = R_{AY} \cdot a - P(a - x)$$

$$M_C = \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot a - a + x$$

$$M_C = \frac{x}{L} \cdot (L - a) \dots\dots\dots(2-8)$$



Gambar II.12 Diagram Gaya Dalam Balok A - B Ketika P di Sisi Kanan C

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Gaya geser: P ketika di sisi kanan C (perhitungan memakai potongan kanan):

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$\Sigma F_Y = R_{BY} - P + V_C$$

$$V_C = P - R_{BY}$$

$$V_C = 1 - \frac{x}{L} = R_{AY} \dots\dots\dots(2- 9)$$

Momen: P ketika di sisi kanan C (perhitungan memakai potongan kanan):

$$\Sigma M_C = 0$$

$$\Sigma M_C = R_{BY} \cdot (L - a) - M_C - P \cdot (x - a)$$

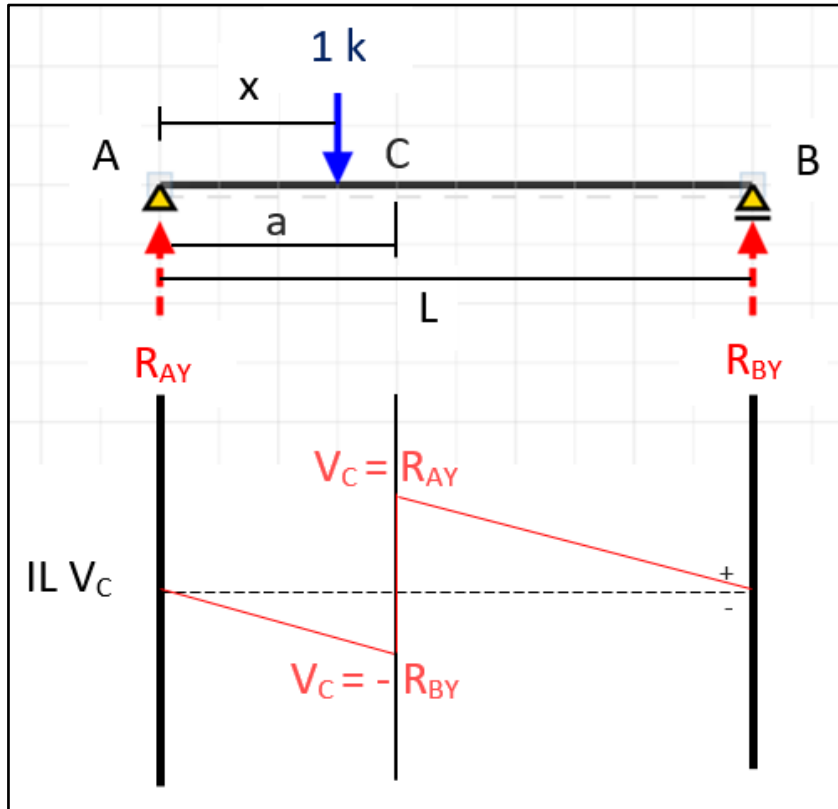
$$M_C = R_{BY} \cdot (L - a) - P \cdot (x - a)$$

$$M_C = \frac{x}{L} \cdot (L - a) - x + a$$

$$M_C = \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot a \dots\dots\dots(2- 10)$$

Berdasarkan rumus di atas, apabila P berada di sebelah kiri C ( $x < a$ ), maka  $V_c = -R_{BY}$ . Apabila P berada di sebelah kanan C ( $x > a$ ), maka  $V_c = R_{AY}$ . Berikut adalah

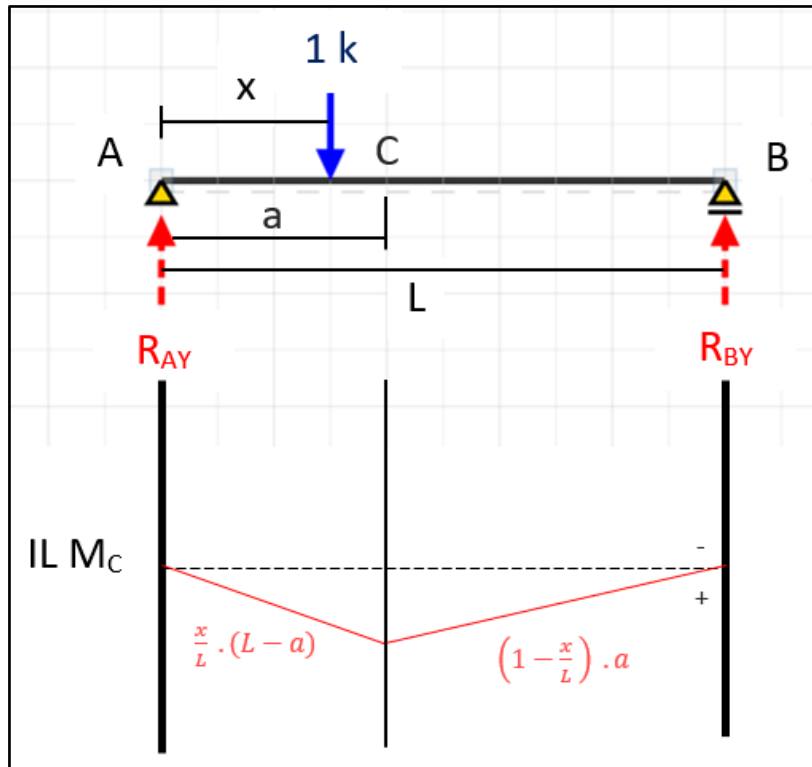
diagram garis pengaruh dari  $V_c$ . (Catatan: Jarak antar  $V_c$  1 dengan  $V_c$  2 harus sama dengan 1).



Gambar II.13 Diagram Garis Pengaruh  $V_c$  pada Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Berdasarkan rumus di atas, apabila P berada di sebelah kiri C ( $x < a$ ), maka  $M_c = \frac{x}{L} \cdot (L - a)$ . Apabila P berada di sebelah kanan C ( $x > a$ ), maka  $M_c = (1 - \frac{x}{L}) \cdot a$ . Berikut adalah diagram garis pengaruh dari  $M_c$ . (Catatan: jika  $x = a$  maka akan mendapatkan momen di titik C).



Gambar II.14 Diagram Garis Pengaruh  $M_c$  pada Balok A - B

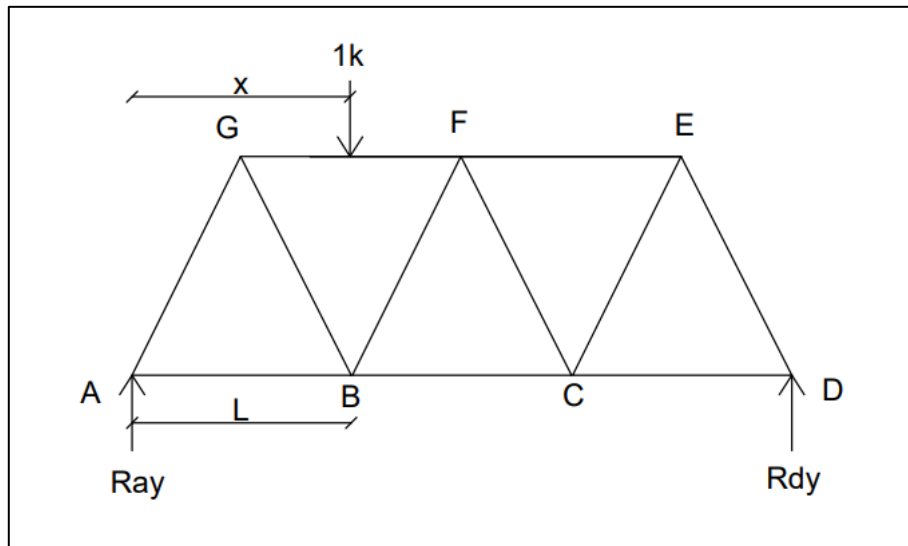
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

#### II.11.4 Garis Pengaruh pada Rangka Batang

Respon struktur yang mungkin terjadi pada rangka batang adalah reaksi-reaksi perletakan dan gaya-gaya dalam pada batang (momen dan gaya geser). Garis pengaruh pada rangka batang dapat dihitung berdasarkan konsep garis pengaruh pada balok dan perlu dijabarkan karena bentuk jembatan kereta api yang akan didesain merupakan struktur rangka batang.

#### II.11.5 Garis Pengaruh Reaksi Perletakan pada Rangka Batang

Gaya reaksi perletakan yang dihasilkan pada satu titik dengan tambahan beban vertikal ke bawah  $P = 1$  yang dapat bergerak dari satu ujung ke ujung lainnya. Gambar 2.15 adalah definisi dari garis pengaruh pada rangka batang yang disajikan secara visual.



Gambar II.15 Skema Garis Pengaruh pada Rangka Batang

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Terdapat gaya vertikal  $R_{AY}$  dan  $R_{DY}$  yang akan dicari. Berikut adalah rumus untuk mencari  $R_{AY}$  dan  $R_{DY}$  pada rangka batang:

$$\Sigma M_D = 0$$

$$1. (3L - x) - R_{AY} \cdot 3L = 0$$

$$R_{AY} = \frac{3L - x}{3L} \dots\dots\dots(2-11)$$

dan

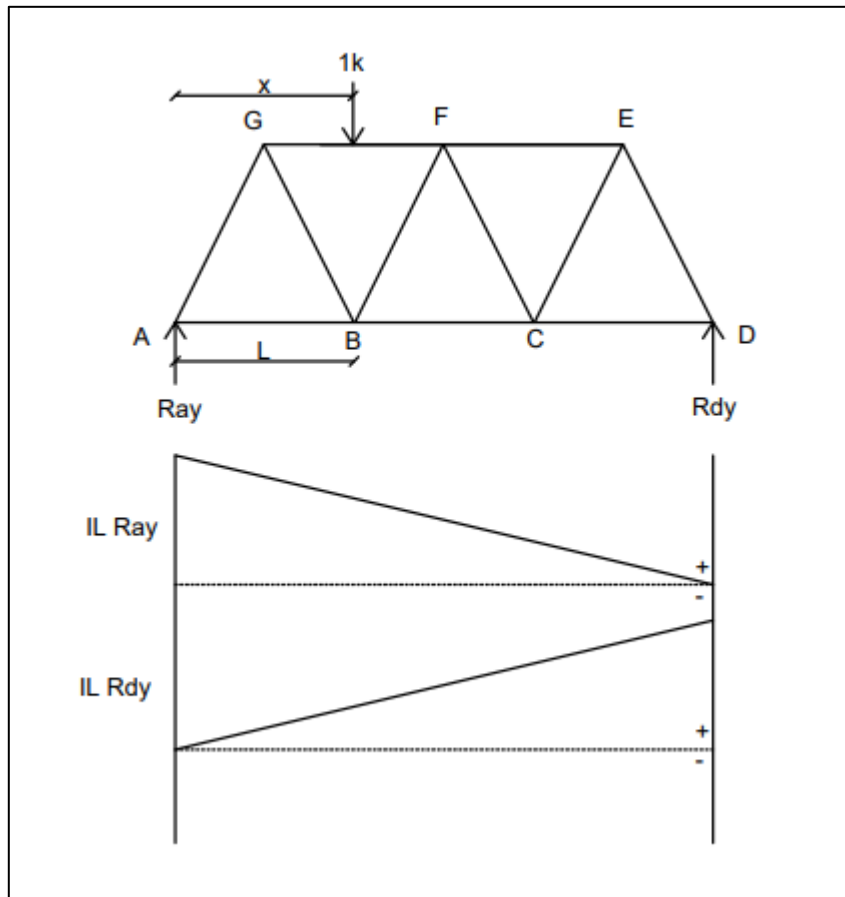
$$\Sigma M_A = 0$$

$$-1 \cdot x + R_{DY} \cdot 3L = 0$$

$$R_{DY} = \frac{x}{3L} \dots\dots\dots(2-12)$$

Berikut adalah gambar diagram garis pengaruh ketika P berada di titik A atau titik D. Hasil perhitungan dari reaksi perletakan Ray dan Rdy dipengaruhi oleh letak beban vertikal ke bawah  $P = 1$ .





Gambar II.16 Diagram Garis Pengaruh Ray dan Rdy Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

### II.11.6 Garis Pengaruh Gaya-Gaya Dalam pada Rangka Batang

Pada struktur rangka batang, diasumsi bahwa gaya yang bekerja hanya di sambungan pin yang memikul gaya aksial atau gaya normal (momen = 0). Berikut adalah perhitungan rumus cara mencari garis pengaruh ketika beban P pada setiap batang dengan menggunakan dua metode. Metode-metode di bawah ini menggunakan prinsip keseimbangan dari keseluruhan dan internal.

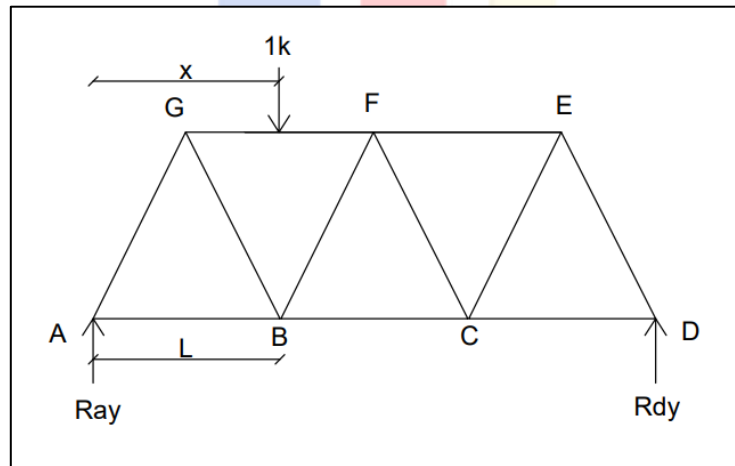
### II.11.7 Metode Keseimbangan Titik Buhul (*Method of Joint*)

Syarat dari penggunaan metode ini adalah menganggap bahwa rangka batang merupakan gabungan dari batang dan titik hubung sehingga gaya batang dapat dihitung dengan cara peninjauan keseimbangan pada titik-titik penghubungnya. Apabila seluruh

gaya batang ingin diketahui, maka metode ini merupakan cara yang efektif digunakan. Berikut langkah-langkah untuk mengerjakan menggunakan metode keseimbangan titik buhul:

- Mengecek stabilitas pada rangka batang melalui rumus  $m \geq 2j - r$
- Penentuan gaya pada reaksi perletakan
- Menggambar *free body diagram* pada setiap batang dan titik penghubung
- Identifikasi geometri untuk batang diagonal atau bersudut
- Identifikasi batang yang memiliki gaya nol dan memiliki keunikan khusus lainnya.
- Peninjauan pada setiap titik penghubung dengan gaya pada reaksi perletakan yang telah dicari dan maksimum terdapat dua gaya yang belum diketahui
- Langkah-langkah ini dilakukan berurutan untuk mencari titik-titik hubung lainnya.

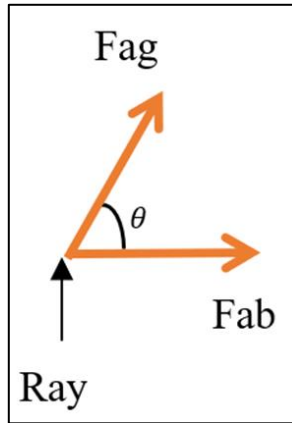
Berikut adalah contoh soal perhitungan dari gaya-gaya batang menggunakan metode keseimbangan titik buhul ( $\Sigma F = 0$ ) dengan mengambil 2 sampel batang.



Gambar II.17 Konstruksi Rangka Batang

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Pada gambar di atas, perhitungan mencari gaya normal pada batang AG dan AB. Gambar 2.17 adalah contoh perhitungan yang dicari gaya normalnya menggunakan analisis keseimbangan momen dengan asumsi juga  $P = 1$  pada titik B, C, atau D:



Gambar II.18 Potongan I  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Gaya normal batang AG

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{ay} + F_{ag} \sin \theta = 0$$

$$F_{ag} = -\frac{R_{ay}}{\sin \theta} \dots \dots \dots (2-13)$$

Gaya normal batang AB

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{ab} + F_{ag} \cos \theta = 0$$

$$F_{ab} = -F_{ag} \cos \theta \dots \dots \dots (2-14)$$

Letak beban vertikal ke bawah  $P = 1$  mempengaruhi hasil dari besarnya reaksi perletakan sehingga mempengaruhi hasil dari gaya normal batang ketika  $P = 1$  diletakkan pada titik-titik yang berbeda. Apabila  $P = 1$  berada di titik A, maka rumus gaya normal pada batang AG saja yang akan ada perbedaan, sedangkan gaya normal pada batang AB sama.

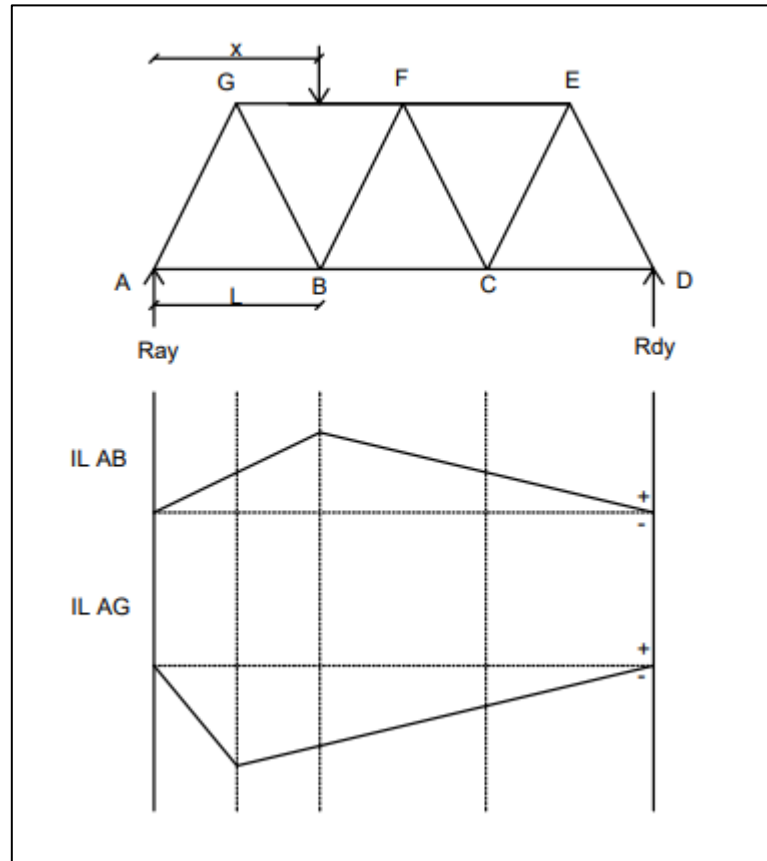
Gaya normal batang AG

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{ay} + F_{ag} \sin \theta - 1 = 0$$

$$F_{ag} = -\frac{R_{ay} + 1}{\sin \theta} \dots \dots \dots (2-15)$$

Setelah reaksi perletakan dan gaya normal pada batang AB dan AG dicari menggunakan persamaan di atas dengan  $P = 1$  berada di titik A, B, C, dan D, maka akan didapatkan diagram garis pengaruh pada batang AB dan AG sebagai berikut.



Gambar II.19 Diagram Garis Pengaruh Batang AB dan AG

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Didapatkan bahwa batang AB memikul gaya tarik (*tension*) dengan nilai maksimum pada titik B, sedangkan batang AG memikul gaya tekan (*compression*) dengan nilai maksimum pada titik G. Namun, kelemahan dari penggunaan *method of joint* adalah maksimum gaya yang tidak hanya 2 di titik *joint* tersebut sehingga jika mau mencari gaya yang terdapat lebih dari 2 dalam titik *joint* tersebut, seperti di titik selain A dan D, tidak dapat dilakukan secara langsung dan harus dihitung satu per satu. Metode ini jarang sekali digunakan karena kurang efektif apabila ingin mencari

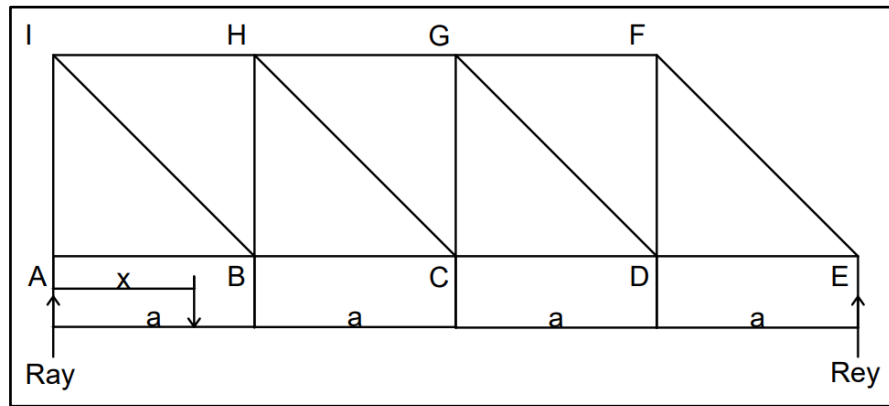
*influence line* di batang yang tersambung pada *joint* yang menampung gaya batang lebih dari 2.

### **II.11.8 Metode Keseimbangan Potongan (*Method of Section*)**

Salah satu cara lainnya untuk menentukan gaya batang maksimum adalah dengan menggunakan metode keseimbangan potongan. Metode ini dilakukan dengan memutuskan konstruksi rangka batang menjadi dua bagian. Pemotongan batang-batang maksimal ada 3 batang untuk menghitung besarnya, menggunakan analisis keseimbangan momen ( $\Sigma M = 0$ ). Apabila nilai gaya positif, maka batang tersebut adalah batang tarik, sedangkan nilai gaya negatif menunjukkan bahwa batang tersebut adalah batang tekan. Berikut adalah cara penyelesaian untuk menghitung besaran gaya pada masing-masing batang:

- a. Konstruksi rangka batang harus dicek apakah konstruksi termasuk struktur statis tertentu;
- b. gaya-gaya reaksi harus ditentukan pada perletakan konstruksi rangka batang;
- c. gaya-gaya luar yang bekerja pada batang didistribusikan pada tiap titik buhul;
- d. potongan pada konstruksi rangka batang dengan maksimal 3 batang yang belum diketahui berapa besar gayanya dan apabila konstruksi rangka batangnya simetris, maka potongan dari kiri dan kanan lebih baik disamakan;
- e. besarnya gaya-gaya batang dihitung berdasarkan analisis keseimbangan momen, dan;
- f. gaya-gaya batang yang sudah didapatkan dikumpulkan dalam bentuk tabel.

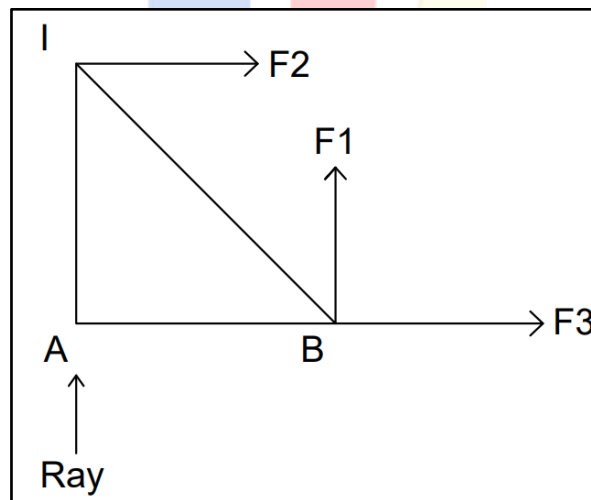
Berikut adalah contoh soal perhitungan dari gaya-gaya batang menggunakan metode keseimbangan potongan.



Gambar II.20 Konstruksi Rangka Batang

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Pada gambar di atas, perhitungan mencari gaya normal pada batang HB. Berikut adalah contoh perhitungan yang dicari gaya normalnya menggunakan analisis keseimbangan momen dengan asumsi  $P = 1$  dengan  $0 \leq x \leq a$  yang ditinjau pada titik B.



Gambar II.21 Potongan I - I

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Gaya normal batang HB

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{ay} + F_1 - 1 = 0$$

$$\frac{L-x}{L} + F_1 - 1 = 0$$

$$F_1 = 1 - 1 + \frac{x}{L}$$

$$F_1 = \frac{x}{L} \dots \dots \dots (2-16)$$

Berikut adalah contoh perhitungan yang dicari gaya normalnya menggunakan analisis keseimbangan momen dengan asumsi  $P = 1$  dengan  $a \leq x \leq 2a$  yang ditinjau pada titik B.

Gaya normal batang HB

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{ay} + F_1 - \frac{2a-x}{a} \cdot 1 = 0$$

$$\frac{L-x}{L} + F_1 - 2 + \frac{x}{a} = 0$$

$$F_1 = 2 - \frac{x}{a} - 1 + \frac{x}{L}$$

$$F_1 = 1 - \frac{x}{a} + \frac{x}{L}$$

$$F_1 = 1 - 2 + \frac{2a}{L}$$

$$F_1 = \frac{2a}{L} - 1 \dots \dots \dots (2-17)$$



Berikut adalah contoh perhitungan yang dicari gaya normalnya menggunakan analisis keseimbangan momen dengan asumsi  $P = 1$  dengan  $2a \leq x \leq 4a$  yang ditinjau pada titik B.

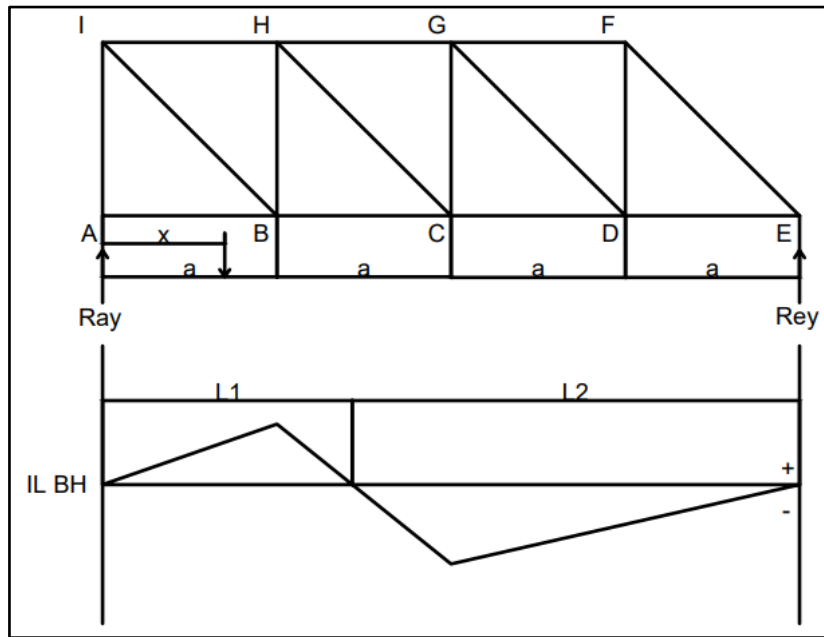
Gaya normal batang HB

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{ay} + F_1 = 0$$

$$\frac{L-x}{L} + F_1 = 0$$

$$F_1 = \frac{x}{L} - 1 \dots\dots\dots(2-18)$$



Gambar II.22 Diagram Garis Pengaruh Batang HB

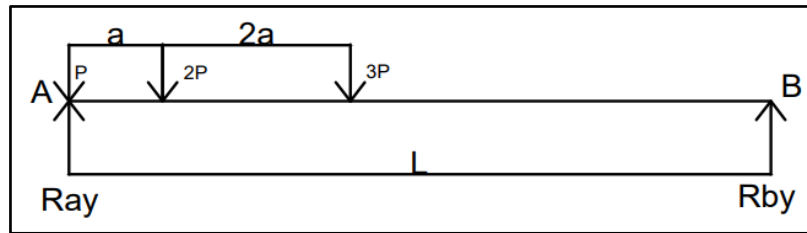
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Didapatkan bahwa batang HB memikul gaya tarik (*tension*) sejarak L1 dengan nilai maksimum pada titik B dan memikul gaya tekan (*compression*) sejarak L2 dengan nilai maksimum pada titik C. Penggunaan metode keseimbangan potongan sangat direkomendasikan, terutama untuk mencari gaya-gaya di batang tertentu karena tidak harus mencari satu-satu gaya di setiap batangnya.

**II.11.9 Garis Pengaruh dengan Variasi Beban**

Pada contoh-contoh di atas, beban  $P = 1$  hanya terdapat satu dan diletakkan pada jarak  $x$  dari titik di reaksi perletakan A. Apabila beban  $P$  tersebut tidak sama dengan 1 dan berjumlah banyak, tetap menggunakan konsep cara menghitung yang sama. Mari ambil contoh gambar 2.12 yang merupakan skema garis pengaruh balok A - B dan memvariasikan berat, jumlah, dan letak bebannya.

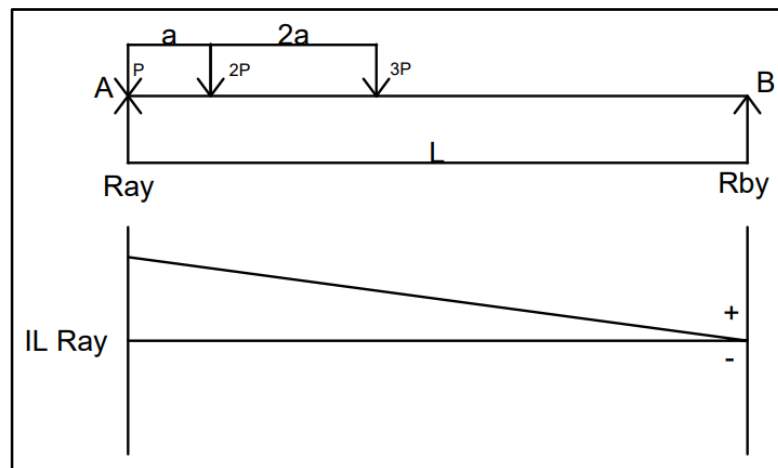




Gambar II.23 Skema Garis Pengaruh Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Dari gambar 2.23 akan dicari hasil dari gaya yang akan ditahan oleh reaksi perletakan pada titik A dengan variasi beban sebesar P tepat pada titik A, beban sebesar 2P pada jarak a dari titik A, dan beban sebesar 3P pada jarak 3a dari titik A. Telah diketahui bahwa garis pengaruh Ray ketika  $P = 1$  seperti pada gambar 2.7.



Gambar II.24 Diagram Garis Pengaruh Ray Balok A - B

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2022)

Setelah mengetahui diagram garis pengaruhnya ketika  $P = 1$ , mari mencari gaya yang akan ditahan oleh reaksi perletakan Ray. Caranya dengan mengalikan masing-masing hasil garis pengaruh dengan gaya vertikal ke bawah dan dijumlahkan.

$$GP R_{AY} = 1P \cdot 1 + 2P \cdot \frac{L - a}{L} + 3P \cdot \frac{L - 3a}{L}$$

$$GP R_{AY} = \frac{1PL + 2PL - 2Pa + 3PL - 9Pa}{L}$$

$$GP R_{AY} = \frac{6PL - 11Pa}{L}$$

$$GP R_{AY} = \frac{P \cdot (6L - 11a)}{L} \dots \dots \dots (2-19)$$

**II.12 Sambungan pada Baja**

Sambungan adalah bagian yang penting karena menyambungkan batang-batang pada baja sehingga menghasilkan struktur yang stabil. Terdapat tiga jenis sambungan yang biasa digunakan untuk menyambung baja, yaitu sambungan las, sambungan baut, dan sambungan rivet (paku keling). Namun, sambungan rivet sudah mulai tidak lagi digunakan.

**II.12.1 Sambungan Las**

Sambungan las merupakan jenis sambungan yang tersambung dengan cara memanaskan baja sampai suhu meleleh, dengan atau tanpa bahan pengisi, dan ketika telah dingin, sambungan akan menyatu dan mengeras. Kelebihan sambungan las dibandingkan sambungan baut adalah sebagai berikut (Supriatna, 2012):

- a. Sambungan ini lebih kokoh karena pertemuan pada sambungan terjadi peleburan dengan elektroda las;
- b. sambungan lebih terlihat rapi dan rata;
- c. sambungan memiliki berat yang lebih ringan daripada sambungan baut, yaitu sebesar 1-1,5% dari total berat struktur, sedangkan sambungan baut sebesar 2,5-4%;
- d. waktu pengerjaan sambungan lebih cepat karena tidak perlu membuat lubang-lubang baut dan pekerjaan tambahan baut lainnya, dan;
- e. kekuatan sambungan tidak tereduksi karena tidak adanya pelubangan pada pelat.

Namun, dibalik kelebihannya, terdapat juga kekurangan dari sambungan las (Supriatna, 2012):

- a. Kualitas pengelasan dapat memengaruhi kekuatan pada sambungan las. Kualitas sambungan las yang baik, maka kekuatan sambungan akan baik. Namun, apabila

kualitas sambungan las tidak baik, maka kekuatan sambungan akan tidak baik dan akan mengakibatkan kegagalan struktur, serta berakibat fatal;

- b. baja-baja yang telah disambung tidak dapat dibongkar pasang. Apabila mau membongkarnya, maka sambungan harus dipotong dan membutuhkan biaya yang cukup besar.

### **II.12.2 Sambungan Baut**

Sambungan yang menggunakan alat pengencang berupa baut, dengan bagian kepala yang biasanya berkepala segi enam dan berbadan silinder berulir. Baut ini dapat digunakan sebagai konstruksi sambungan yang sifatnya tetap, sambungan bergerak, dan sambungan yang sifatnya sementara agar dapat dibongkar pasang. Berikut adalah kelebihan-kelebihan dari sambungan baut jika dibandingkan dengan sambungan las (Tim BIM, 2021):

- a. Penyambungan atau pemasangan sambungan baut di lapangan lebih mudah;
- b. sambungan dapat sifatnya sementara sehingga konstruksi dapat dibongkar pasang;
- c. dapat menyambung dengan total tebal pelat baja  $> 4 db$ , berbeda dengan paku keling yang total tebal pelat baja maksimum hingga 4 diameter baut saja;
- d. konstruksi dengan menggunakan baut *pass* atau baut mutu tinggi dapat digunakan untuk konstruksi yang berat, seperti jembatan.

Namun, dibalik kelebihannya, terdapat juga kekurangan dari sambungan baut (Tim BIM, 2021):

- a. Pembuatan sambungan harus presisi, apabila tidak presisi maka baut tidak akan terpasang sempurna;
- b. kekuatan tarik baja tereduksi karena adanya lubang baut pada pelat sehingga perlu diperhitungkan;
- c. perlu melakukan pengecekan terhadap sambungan baut secara berkala apabila terjadi kelonggaran atau korosi, dan;
- d. beban konstruksi menggunakan sambungan baut lebih berat dibandingkan dengan menggunakan sambungan las.

### II.12.3 Pemilihan Metode Sambungan untuk Jembatan Kereta Api

Berdasarkan pertimbangan kelebihan dan kekurangan pada masing-masing sambungan di atas, pemasangan ini harus dilakukan dengan mempertimbangkan bagaimana proses dari fabrikasi, transportasi, hingga *erection* yang dapat memengaruhi biaya, waktu, dan kualitas dari struktur jembatan kereta api ini sendiri.

Karena jembatan ini dipasang pada ketinggian, maka dapat menggunakan sambungan las atau baut. Apabila menggunakan sambungan las, maka lebih disarankan melakukan sambungannya di *workshop* daripada di lapangan karena sulitnya menyediakan peralatan-peralatan las ketika berada di ketinggian (Holowaty & Wichtowski, 2022). Di *workshop* juga lebih dapat dipantau mutu dari hasil las itu sendiri. Namun, permasalahannya lagi adalah di bagian transportasi pengantaran dan pengangkatan profil baja jembatan kereta api yang telah dilas, hal tersebut menjadi sebuah kesulitan bagi pihak-pihak terkait karena tonase dan dimensinya yang sangat besar.

Jembatan ini lebih cocok dirakit di lapangan proyek karena tonase dan dimensinya yang sangat besar. Alasan ini menyebabkan sambungan baut menjadi salah satu pilihan yang paling unggul dalam pemasangannya yang mudah. Pemasangannya dapat mudah dilakukan di ketinggian karena tidak memerlukan peralatan-peralatan khusus seperti las. Kualitas sambungan juga tidak perlu dikhawatirkan karena pemasangannya tidak membutuhkan teknik khusus sehingga tidak memengaruhi kualitas sambungannya.

Memang kekuatan dari sambungan las apabila dilakukan dengan baik dapat menjadi lebih kokoh dan baik untuk dipertimbangkan pada struktur jembatan kereta api yang membutuhkan kekuatan tahanan yang besar dibandingkan sambungan baut (Supriatna, 2012). Namun, keputusan mengenai pemilihan sambungan baut sebagai sambungan untuk jembatan kereta api menjadi keputusan yang lebih tepat, dengan menghitung semua beban-beban *ultimate* yang akan ditahan struktur dan sambungan hingga memenuhi persyaratan nominal. Kekuatan baut pun tidak akan menjadi masalah yang besar apabila direncanakan dengan matang dan tepat. Pemeliharaan juga dapat dilakukan secara terjadwal dan berkala.

#### II.12.4 Jenis Sambungan Baut

Baut sendiri dibagi berdasarkan jenis-jenisnya. Jenis baut yang pertama adalah *unfinished bolt* atau biasa juga disebut *common bolt*. Baut ini terbuat dari besi karbon dan kepala baut berbentuk persegi maupun heksagon, serta masuk ke kelas baut A307. Penggunaan *Unfinished bolt* untuk struktur ringan saja sehingga sambungan pada struktur jembatan tidak cocok memakai jenis baut ini. Jenis baut kedua adalah *high strength bolt* yang terbuat dari medium karbon dan besi aluminium alloy. Baut ini memiliki kekuatan tarik 2 kali lebih besar daripada *unfinished bolt* sehingga penggunaannya dapat dilakukan untuk struktur kecil sampai besar. Baut ini cocok untuk dipakai sebagai sambungan jembatan.

*High strength bolt* terbagi menjadi dua kelas, yaitu kelas baut A325 yang terbuat dari medium karbon dan kelas baut A490 yang terbuat dari besi aluminium alloy. Berikut adalah tabel kelas *high strength bolt* untuk kapasitas kuat tarik dan kuat geser berdasarkan SNI 1729-2015.

Tabel II.15 Kapasitas Kuat Tarik dan Kuat Geser pada Kelas Baut

Jenis Baut	Kuat Tarik Nominal $F_{nt}$ (MPa)	Kuat Geser Nominal $F_{nv}$ (MPa)	Keterangan
A 307	310	188	Baut non-struktural
A 325	620	372	Ulir baut dalam daerah geser
A 325	620	457	Ulir baut tidak dalam daerah geser
A 490	780	457	Ulir baut dalam daerah geser
A 490	780	579	Ulir baut tidak dalam daerah geser

(Sumber: SNI 1729:2015)

Kemudian, untuk *high strength bolt* memiliki ukuran yang bermacam-macam sehingga mempengaruhi gaya tarik dari baut tersebut. Semakin besar diameter baut, maka semakin besar pula gaya tarik yang dapat ditahan oleh baut. Berikut adalah tabel untuk variasi diameter baut dan besar gaya tarik yang dapat ditahan berdasarkan diameternya.

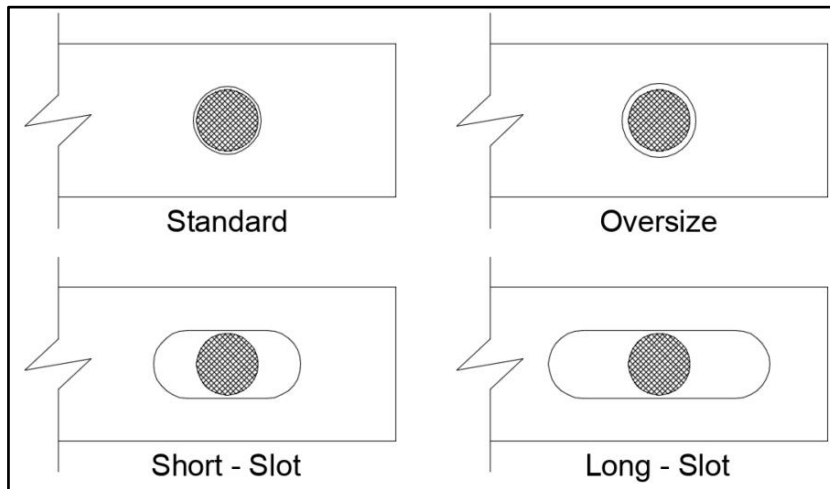
Tabel II.16 Diameter dan Gaya Tarik Baut A325 dan A490

Diameter Baut	Tipe Baut A325 (kN)	Tipe Baut A490 (kN)
16	91	114
20	142	179
22	176	221
24	205	257
27	267	334
30	326	408
36	475	595

(Sumber: SNI 1729:2015)

### II.12.5 Bentuk dan Dimensi Lubang Baut

Terdapat empat tipe bentuk lubang baut pada baja, yaitu tipe *standard*, *oversize*, *short-slot*, dan *long-slot*. Berikut adalah ilustrasi dari empat tipe bentuk lubang bautnya, serta dimensi dari lubang baut yang sesuai dengan standar.



Gambar II.25 Empat Bentuk Lubang Baut pada Baja

(Sumber: SNI 1729:2015)

Tabel II.17 Ketentuan Diameter pada Masing-Masing Bentuk Lubang Baut

Diameter Baut (mm)	Standard (mm)	Oversize (mm)	Short-Slot (mm)	Long-Slot (mm)
16	18	20	18 x 22	18 x 40
20	22	24	22 x 26	22 x 50
22	24	28	24 x 30	24 x 55
24	27	30	27 x 32	27 x 60
27	30	35	30 x 37	30 x 67
30	33	38	33 x 40	33 x 75
$\geq 36$	(d+3)	(d+8)	(d+3) x (d+10)	(d+3) x 2.5d

(sumber: SNI 1729:2015)

Tipe lubang standar biasanya menjadi tipe yang sering digunakan untuk membuat lubang baut mur karena toleransi dalam membuat lubang tipe ini sangat kecil. Toleransi inilah menyebabkan baut kemungkinan kecil mengalami selip sehingga

rangka baja lebih kokoh dan dapat menahan momen, serta menyalurkannya pada rangka-rangka baja yang lebih kuat. Namun, karena toleransinya sangat kecil, apabila pengeboran lubang baut tidak sesuai atau lebih dari toleransi, maka baut mur tidak dapat terpasang. Hal ini dapat menyebabkan lubangnya menjadi oval (Standar Nasional Indonesia, 2016).

Tipe lubang lebih atau plus (*oversize*) memiliki lubang baut yang cukup besar dibandingkan standar yang lebih berpotensi mengalami selip sehingga dapat menimbulkan reaksi geser dan tumpu. Hal ini menyebabkan rangka-rangka baja tidak kokoh, lemah, dan dapat mengalami lentur. Namun, lubang baut yang besar memiliki kelebihan, yaitu pemasangan baut menjadi sangat mudah karena toleransinya  $\leq 4$  milimeter. Walaupun terjadi kesalahan saat pengeboran lubang, baut mur kemungkinan masih dapat terpasang. Penggunaan tipe lubang ini sering diterapkan pada angkur baja dan tumpuan sendi atau jepit (Standar Nasional Indonesia, 2016).

Lubang oval slot pendek atau ruang bebas pendek digunakan pada salah satu atau seluruh lapisan sambungan yang dirancang sesuai dengan tegangan yang diijinkan dan arah gaya beban sebesar 80 hingga 100 derajat dari sumbu lubang slot. Apabila tidak ingin memperhatikan arah gaya beban kepada salah satu atau seluruh lapisan sambungan, maka *allowable slip resistance* atau anti licin yang diijinkan harus lebih besar daripada beban yang diberikan. Dibutuhkan juga tambahan *washer* pada baut agar tidak kendur dan dapat menyalurkan beban baut secara merata ke permukaan. Alasan penggunaan *short slot* umumnya karena sulit di *erection* saat di lapangan sehingga membutuhkan media lubang *short slot* untuk menggeser-geser baja, dengan syarat telah disetujui oleh pihak konsultan sesuai kekuatan yang diijinkan (The Art of Technical Drawing, 2021).

Lubang oval slot panjang atau ruang bebas panjang memiliki fungsi dan kegunaan yang sama dengan lubang oval slot pendek. Namun, perbedaannya terdapat pada jumlah lapisan sambungan maksimum dua untuk lubang oval slot panjang,

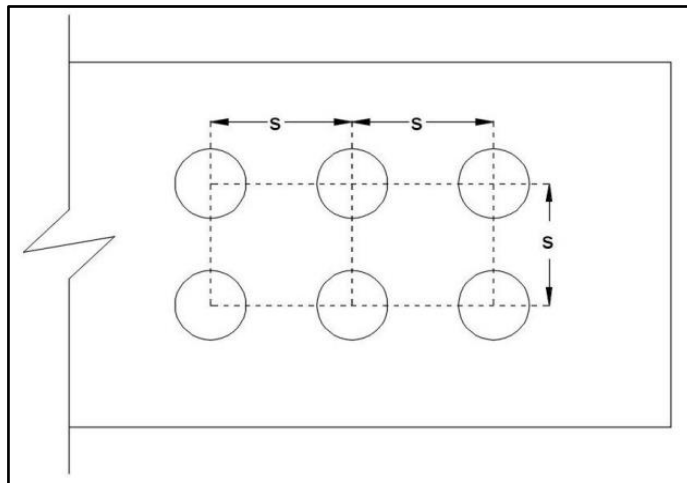


sedangkan lubang oval slot pendek dapat dipasang lapisan sambungannya lebih dari dua. Untuk penyambungannya sendiri, bentuk lubang *long slot* hanya diijinkan salah satu saja, sementara bentuk lubang pada lapisan lainnya wajib standar. Sementara bentuk *short slot* diijinkan untuk digunakan pada dua lapisan dipenyambungannya (The Art of Technical Drawing, 2021).

### II.12.6 Jarak dan Penempatan Baut

Jarak minimum antar baut ke baut pada sambungan baja harus  $\geq 3$  kali diameter baut, yang dihitung dari as ke as.

$$S \geq 3d \dots\dots\dots(2-20)$$



Gambar II.26 Jarak Minimum Antar Baut ke Baut

(sumber: SNI 1729:2015)

Sementara itu, untuk jarak maksimum dari baut ke baut dibagi berdasarkan menahan atau tidak menahan korosi.

- a. Struktur dicat atau tidak dicat yang tidak menahan korosi

$$S \leq 24t \dots\dots\dots(2-21)$$

$$S < 305 \text{ mm} \dots\dots\dots(2-22)$$

Keterangan:

t = ketebalan dari bagian tertipis

- b. Struktur tidak dicat yang berhubungan dengan cuaca yang menahan korosi

$$S \leq 14t \dots\dots\dots(2-23)$$

$$S < 180 \text{ mm} \dots\dots\dots(2-24)$$

Lalu, terdapat jarak dan penempatan baut berdasarkan jarak dari tepi baja ke as lubang baut. Berikut adalah tabel diameter baut dan jarak tepi minimumnya.

Tabel II.18 Spasi minimum baut dari tepi berdasarkan diameternya

Diameter Baut (mm)	Jarak Tepi Minimum (mm)
16	22
20	26
22	28
24	30
27	34
30	38
36	46
> 36	1,25 d

(sumber: SNI 1729:2015)

Sementara itu, terdapat juga jarak maksimum baut dari as hingga ke tepi baja, yaitu:

$$S \leq 12t \dots\dots\dots(2-25)$$

$$S < 150 \text{ mm} \dots\dots\dots(2-26)$$

### II.12.7 Syarat Kekuatan pada Sambungan Baut

Kekuatan-kekuatan yang perlu dianalisa dan dihitung pada sambungan baut agar memenuhi persyaratan, yaitu:

a. Kuat leleh, dilakukan pada profil atau pelat sambungan agar tidak mengalami kegagalan karena gaya yang terjadi pada sambungan, dengan syarat kekuatan baut lebih besar dari kekuatan profil atau pelat.

- Kuat nominal leleh tarik profil/pelat

$$\phi R_n = \phi A_g \cdot f_y \dots \dots \dots (2-27)$$

- Kuat nominal leleh geser profil/pelat

$$\phi R_n = \phi \cdot 0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y \dots \dots \dots (2-28)$$

Keterangan:

$A_g$  = luas *gross* penampang tanpa mereduksi lubang baut ( $mm^2$ )

$A_{gv}$  = luas *gross* penampang pada bidang geser sambungan ( $mm^2$ )

$f_y$  = kuat leleh minimum dari profil atau pelat yang disambung (MPa)

$\phi$  = faktor reduksi leleh tarik (0,9)

$\phi$  = faktor reduksi leleh geser (1,0)

b. Kuat putus, dilakukan pada profil atau pelat sambungan agar tidak mengalami kegagalan karena gaya yang terjadi pada sambungan, dengan syarat kekuatan baut lebih besar dari kekuatan profil atau pelat.

- Kuat nominal putus tarik profil/pelat

$$\phi R_n = \phi A_e \cdot f_u \dots \dots \dots (2-29)$$

- Kuat nominal putus geser profil/pelat

$$\phi R_n = \phi \cdot 0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u \dots \dots \dots (2-30)$$

Keterangan:

$A_e$  = luas efektif dari penampang yang disambung ( $mm^2$ )

$A_{nv}$  = luas *netto* / bersih penampang di bidang geser sambungan ( $mm^2$ )

$f_u$  = kuat putus minimum dari profil atau pelat yang disambung (MPa)

$\phi$  = faktor reduksi putus tarik dan putus geser (0,75)

c. *Block shear*, dilakukan pada sambungan baut agar tidak mengalami kegagalan karena geser pada sekitar lubang, kekuatan dipengaruhi dari formasi dan jarak antar lubang. Kuat nominal *block shear*:

$$\phi R_n < \phi R_{nmax} \dots \dots \dots (2-31)$$

$$\phi R_n = \phi [(0,6 \cdot A_{nv} \cdot f_u) + (U_{bs} \cdot f_u \cdot A_{nt})] \dots \dots \dots (2-32)$$

$$\phi R_{nmax} = \phi [(0,6 \cdot A_{gv} \cdot f_y) + (U_{bs} \cdot f_u \cdot A_{nt})] \dots \dots \dots (2-33)$$

Keterangan:

$U_{bs}$  = bila gaya tarik merata (1), bila gaya tarik tidak merata (0,5)

$A_{nv}$  = luas *netto* / bersih penampang di bidang geser sambungan ( $mm^2$ )

$A_{gv}$  = luas *gross* penampang pada bidang geser sambungan ( $mm^2$ )

$A_{nt}$  = luas *netto* / bersih penampang di bidang tarik sambungan ( $mm^2$ )

$f_u$  = kuat putus minimum dari profil atau pelat yang disambung (MPa)

$\phi$  = faktor reduksi *block shear* (0,75)

d. *Bearing strength* (kuat tumpu), di mana baut menumpu pada profil atau pelat sambungan dan dilakukan untuk mencegah kegagalan karena gaya yang ditransfer baut, kekuatan dipengaruhi dari formasi dan jarak antar lubang.

- Kuat nominal *bearing strength* untuk baut dengan lubang *standard*, *oversize*, *short-slot*, serta khusus *long-slot* dengan arah gaya sejajar arah slot:

$$\phi R_n < \phi R_{nmax} \dots \dots \dots (2-34)$$

$$R_n = 1,2 \cdot l_c \cdot t_p \cdot f_u \dots \dots \dots (2-35)$$

$$R_{nmax} = 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u \dots \dots \dots (2-36)$$

- Kuat nominal *bearing strength* khusus *long-shot* dengan arah gaya tegak lurus arah slot:

$$\phi R_n < \phi R_{nmax} \dots \dots \dots (2-37)$$

$$R_n = 1,0 \cdot l_c \cdot t_p \cdot f_u \dots \dots \dots (2-38)$$

$$R_{nmax} = 2,0 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u \dots \dots \dots (2-39)$$

Keterangan:

$R_n$  = kuat tumpu nominal

$R_{nmax}$  = kuat tumpu nominal maksimum

$l_c$  = jarak bersih dari tepi lubang atau profil yang searah gaya

$d_b$  = diameter baut pada daerah tak berulir

$t_p$  = tebal pelat

$f_u$  = kuat tarik putus terendah dari baut atau pelat

e. *Strength of bolt* (kekuatan baut) yang menerima gaya pada sambungan dan memiliki kekuatan tarik baut, serta geser baut.

- Apabila baut lebih cenderung menerima gaya tarik, baut dapat tertarik atau tercabut karena gaya yang bekerja sehingga kuat nominalnya harus dihitung.

$$R_n = \phi \cdot F_{nt} \cdot A_b \dots \dots \dots (2-40)$$

- Apabila baut lebih cenderung menerima gaya geser dan jenis sambungan yang sering digunakan. Kuat nominalnya harus dihitung.

$$R_n = \phi \cdot F_{nv} \cdot A_b \dots \dots \dots (2-41)$$

Keterangan:

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan (0,75)

$F_{nv}$  = kuat geser nominal baut (MPa)

$A_b$  = luas baut ( $mm^2$ )

### II.12.8 Persyaratan dan Perencanaan pada Baja sebagai Elemen Tarik

Baja merupakan material struktur yang cenderung menerima gaya tarik (*tension*) yang sejajar dengan sumbu pada batangnya. Namun, kelemahannya adalah pada bagian sambungan yang menyebabkan reduksi pada luas penampang tariknya, terutama pada sambungan baut. Dibutuhkan pemeriksaan untuk tahanan nominal yang dapat menyebabkan keruntuhan akibat tiga kondisi:

- a. Leleh dari luas penampang kotor yang daerahnya jauh atau di luar area sambungan
- b. Fraktur dari luas penampang efektif pada daerah sambungan
- c. Geser blok pada sambungan

**II.12.9 Faktor Reduksi Kekuatan**

Faktor reduksi kekuatan dengan lambang  $\phi$  dijabarkan pada tabel sebagai berikut untuk keadaan batas *ultimate*.

Tabel II.19 Faktor Reduksi Kekuatan berdasarkan Situasi Rencana

Situasi Rencana	Faktor Reduksi Kekuatan, $\phi$
Lentur	0,90
Geser	0,90
Aksial tekan	0,85
Aksial tarik	
1. Terhadap kuat tarik leleh	0,90
2. Terhadap kuat tarik fraktur	0,75
Penghubung geser	0,75
Sambungan baut	0,75
Hubungan Las	
1. Las tumpul penetrasi penuh	0,90
2. Las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75

(Sumber: RSNI T-03-2005)

**II.12.10 Kuat Tarik Baja Rencana**

Berdasarkan peraturan RSNI T-03-2005 pada persamaan 5.1-1, berikut adalah persyaratan tahanan nominal yang memenuhi.

$$T_u \leq \phi T_n \dots\dots\dots(2-42)$$

Keterangan:

Tu = gaya tarik aksial terfaktor

$T_n$  = tahanan nominal penampang

$\phi$  = faktor tahanan (kuat tarik leleh = 0.9, kuat tarik fraktur = 0.75)

Untuk memeriksa kekuatan tarik pada daerah yang berada di luar sambungan, maka diperlukan analisa kuat leleh.

$$T_n = A_g \cdot f_y \dots \dots \dots (2-43)$$

Keterangan:

$A_g$  = luas penampang kotor ( $mm^2$ )

$f_y$  = kuat leleh baja (MPa)

Apabila telah melewati batas tegangan leleh, maka diperlukan analisa ketika baja dalam kondisi fraktur untuk mengecek kekuatan batang pada daerah sambungan. Namun, tidak disarankan hingga tipe jenis keruntuhan ini karena lebih getas dan berbahaya.

$$T_n = A_e \cdot f_u \dots \dots \dots (2-44)$$

Keterangan:

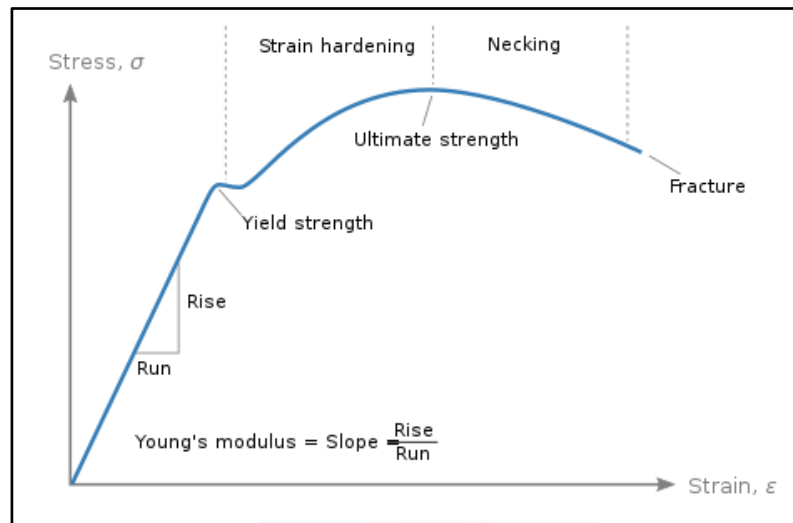
$A_e$  = luas penampang efektif ( $mm^2$ )

$f_u$  = tegangan putus baja (MPa)

### II.12.11 Karakteristik Material Baja dan Kurva Tegangan-Regangan

Pada material baja, terdapat tegangan yang bekerja pada penampang baja dan responnya berupa regangan. Regangan adalah pertambahan panjang akibat tegangan yang diberikan. Hal ini mempengaruhi faktor keamanan, yaitu tegangan yang diberikan tidak melebihi batas elastis atau leleh (*yield strength*) agar baja dapat kembali ke bentuk seperti semula apabila tidak ada tegangan yang bekerja di baja tersebut. Apabila melewati batas tegangan leleh, maka dapat menyebabkan material baja tidak dapat kembali ke bentuk semua dan merenggang dengan cepat (*ultimate strength*). Jikalau dibiarkan merenggang, maka material baja akan sampai menyentuh titik tegangan *ultimate* atau titik putus (*fracture*). Berikut adalah grafik dari batas kekuatan tarik baja,

baik kekuatan luluh dan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh baja tersebut apabila ditarik.



Gambar II.27 Kurva Tegangan dan Regangan Baja

(sumber: Setiawan, 2021)

Terdapat variasi mutu baja, dari mutu rendah hingga mutu tinggi. Semakin tinggi mutunya, maka semakin besar gaya atau tegangan yang dibutuhkan agar baja tersebut mencapai titik leleh dan titik putusnya.

Tabel II.20 Mutu Baja dan Tegangan Leleh-Putus

Mutu Baja	Tegangan Leleh ( $F_y$ – $MPa$ )	Tegangan Putus ( $F_u$ – $MPa$ )	Peregangan Minimum (%)
BJ 34	210	340	22
BJ 37	240	370	20
BJ 41	250	410	18
BJ 50	290	500	16
BJ 55	410	550	13

(Sumber: RSNI T-03-2005)

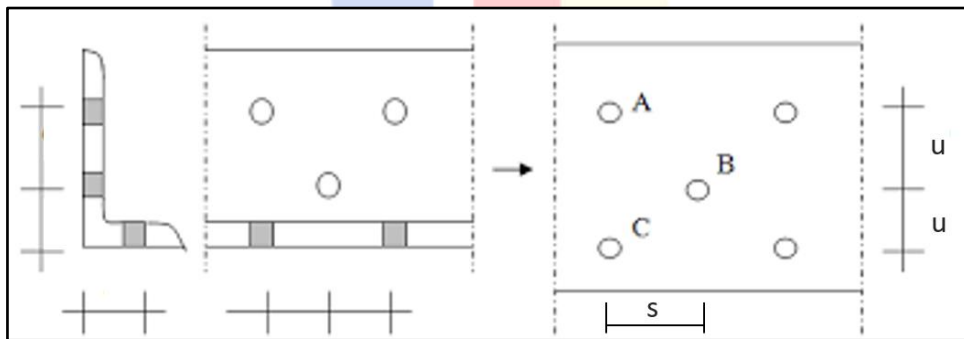


Berikut adalah sifat-sifat mekanis baja:

- Massa jenis baja ( $\gamma$ ) = 7800 kg/m<sup>3</sup>
- Modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa
- Modulus geser (G) = 80.000 MPa
- Angka poisson ( $\mu$ ) = 0,3
- Koefisien pemuaian ( $\alpha$ ) = 12 x 10<sup>-6</sup> per °C

### II.12.12 Luas Penampang Netto

Khususnya pada sambungan baut, terdapat lubang-lubang yang berada pada sambungannya sehingga luas penampang tereduksi yang biasa disebut luas netto ( $A_n$ ). Besarnya tegangan tarik di sekitar lubang baut diperkirakan 3 kali lebih besar dari tegangan rata-rata penampang netto, namun jika baja telah mencapai titik leleh, maka tegangan menjadi sebesar  $f_y$  dan terjadi deformasi berkelanjutan yang dapat menyebabkan patah atau kondisi fraktur pada sambungannya. Pada area sambungan baut, berikut adalah terdapat 2 rumus luas penampang netto berdasarkan patahan tariknya menurut RSNI T-03-2005.



Gambar II.28 Penampang Siku L

(Sumber: RSNI T-03-2005, 2021)

a. Potongan A - C

$$A_n = A_g - n \cdot d \cdot t \dots \dots \dots (2-45)$$

b. Potongan A - B - C

$$A_n = A_g - n \cdot d \cdot t + \Sigma \frac{s^2 t}{4u} \dots \dots \dots (2-46)$$

Keterangan:

$A_n$  = luas penampang netto ( $mm^2$ )

$A_g$  = luas penampang bruto/kotor ( $mm^2$ )

t = tebal penampang (mm)

d = diameter lubang baut (mm)

n = banyak lubang baut

s = jarak antara lubang B dan C (mm)

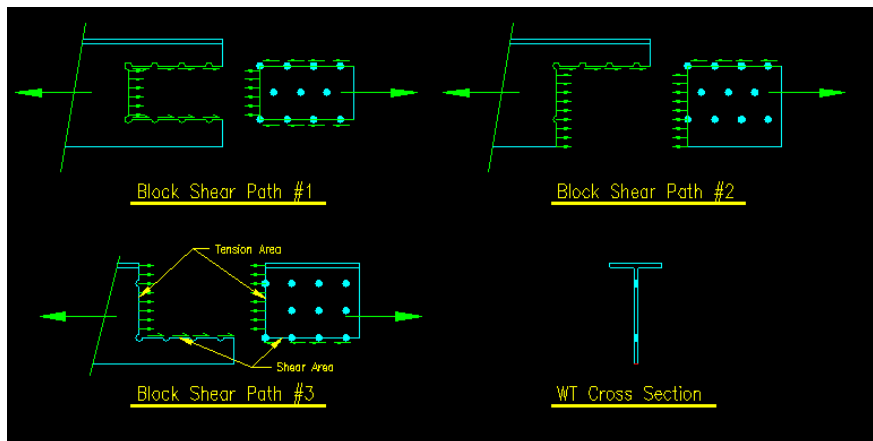
u = jarak antara lubang A dan B atau B dan C (mm)

Untuk diameter lubang baut  $< 24$  mm, maka terdapat tambahan diameter sebesar 2 mm, sedangkan untuk diameter lubang baut  $\geq 24$  mm, maka dibutuhkan tambahan diameter sebesar 3 mm yang akan dimasukkan ke rumus di atas. Lalu, luas penampang netto tidak boleh lebih besar dari 85% luas penampang kotor.

$$A_n \leq 0.85 A_g \dots \dots \dots (2-47)$$

### II.12.13 Block Shear Strength pada Baja

*Block Shear* atau geser blok adalah besar tahanan pelat baja pada elemen tarik yang terjadi pada batang dan daerah sambungan. Keruntuhan geser blok merupakan penjumlahan tarik leleh (atau tarik fraktur) pada satu irisan dengan geser fraktur (atau geser leleh) pada irisan lainnya yang tegak lurus.



Gambar II.29 Jalur-Jalur Keruntuhan Geser Blok

(Sumber: T. Barlett Quimby, 2011)

Berikut adalah rumus kuat putus pada bidang tarik, yaitu bidang yang tegak lurus dengan gaya tarik aksial berdasarkan RSNI T-03-2005.

$$T_{nt} = f_u \cdot A_{et} \dots \dots \dots (2-48)$$

Sedangkan, berikut ini adalah rumus kuat putus pada bidang geser, yaitu bidang yang searah dengan gaya tarik aksial.

$$T_{nv} = 0,6 \cdot f_u \cdot A_{ev} \dots \dots \dots (2-49)$$

Keterangan:

$T_{nt}$  = kuat putus tarik

$T_{nv}$  = kuat putus geser

$A_{et}$  = luas efektif akibat tarik

$A_{ev}$  = luas efektif akibat geser

Tahanan nominal tarik dalam *block shear strength* dapat dihitung berdasarkan dua kondisi yang menghasilkan rumus yang berbeda.

- a. Kuat putus tarik ( $T_{nt}$ )  $\geq$  kuat putus geser ( $T_{nv}$ )

$$T_n = 0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + f_u \cdot A_{et} \dots \dots \dots (2-50)$$

- b. Kuat putus tarik ( $T_{nt}$ )  $<$  kuat putus geser ( $T_{nv}$ )

$$T_n = 0,6 \cdot f_u \cdot A_{ev} + f_y \cdot A_{gt} \dots \dots \dots (2-51)$$

Keterangan:

$T_n$  = tahanan nominal

$A_{gv}$  = luas kotor akibat geser

$A_{gt}$  = luas kotor akibat tarik

#### II.12.14 Luas Efektif dan *Shear Lag* pada Baja

Luas efektif mengalami gaya tarik pada penampang struktur yang dapat dihitung dengan mengurangi luas penampang dengan luas lubang baut.

$$A_e = A_n \cdot U \dots \dots \dots (2-52)$$

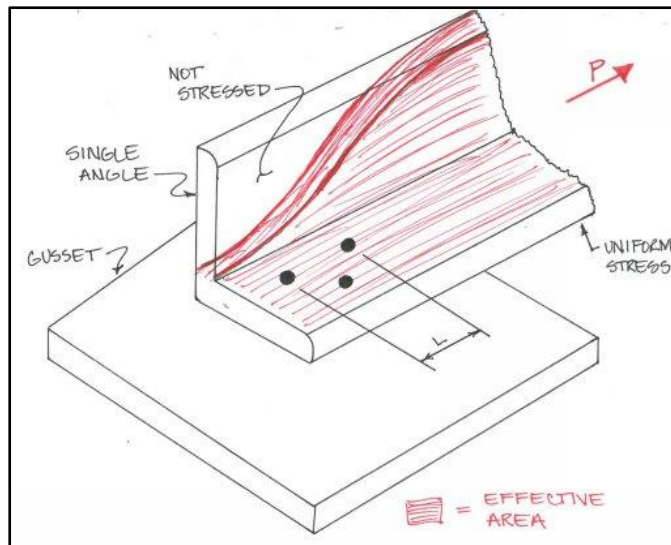
Keterangan:

$A_e$  = luas penampang efektif ( $mm^2$ )

$A_n$  = luas penampang netto ( $mm^2$ )

$U$  = koefisien reduksi akibat *shear lag* pada elemen tarik

Baja dapat mengalami *shear lag*, yaitu peristiwa di mana aliran tegangan yang tidak merata karena keterbatasan alat sambung yang menyebabkan baja tidak tersambung sempurna sehingga nilai  $U < 1$ . *Shear lag* dihitung karena merupakan faktor keamanan akibat kekurangan pada pelaksanaannya.



Gambar II.30 Ilustrasi Shear Lag pada Sambungan Baut

(Sumber: Cable Stay, 2015)

Pada sambungan baut, dapat terjadi 2 kondisi *shear lag* apabila terjadi gaya tarik pada baja yang disalurkan ke sambungannya:

- Apabila semua sisi tersambung baut dan gaya tarik tersalurkan, maka nilai koefisien reduksinya:

$$U = 1 \dots \dots \dots (2-53)$$

- Apabila satu sisi tersambung baut dan gaya tarik tersalurkan, serta terdapat sisi lain yang tidak tersambung, maka nilai koefisien reduksinya:

$$U = 1 - \frac{x}{L} \dots \dots \dots (2-54)$$

Keterangan:

x = eksentrisitas sambungan atau titik berat elemen tarik ke pelat sambungan

L = panjang sambungan dari baut pertama ke baut terakhir pada arah gaya tarik

U harus lebih kecil sama dengan 0,9

### II.12.15 Kelangsingan Struktur

Batas kelangsingan struktur diatur dalam RSNI T-03-2005 agar mengurangi terjadinya getaran ekstrim dan lendutan yang besar ketika menopang beban dinamis sehingga elemen tarik tetap memenuhi syarat kekakuan. Batas kelangsingan diatur berdasarkan dua kondisi:

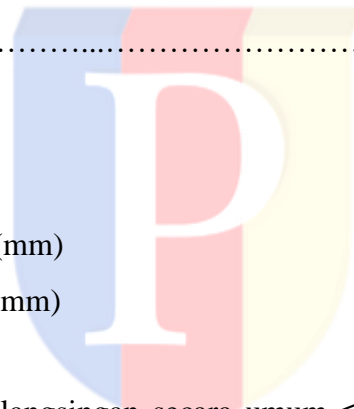
$$\lambda = \frac{L}{r} \dots \dots \dots (2-55)$$

Keterangan:

$\lambda$  = kelangsingan struktur

L = panjang elemen struktur (mm)

r = jari-jari girasi profil baja (mm)



Persyaratan angka kelangsingan secara umum  $\leq 300$ . Semakin besar angka kelangsingan, semakin kecil pula beban yang dapat dipikul.

### II.13 Persyaratan dan Perencanaan pada Baja sebagai Elemen Tekan

Selain menerima gaya tarik, ada elemen-elemen struktur yang mengalami gaya aksial tekan sehingga menyebabkan struktur memendek. Namun, hal ini dapat menyebabkan fenomena tekuk atau *buckling* sehingga dapat terjadi keruntuhan sebelum mencapai batas titik lelehnya ( $f_y$ ). Keruntuhan jenis ini sering terjadi pada struktur yang panjang sehingga faktor kelangsingan sangat penting untuk dipertimbangkan karena berpengaruh pada struktur tekan.

$$\lambda = \frac{L_k}{r} = \frac{k.L}{r} \dots \dots \dots (2-56)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots \dots \dots (2-57)$$

Keterangan:

$\lambda$  = angka kelangsingan

$L_k$  = panjang efektif elemen struktur tekan (mm)

k = faktor tekuk

L = panjang elemen struktur tekan (mm)

$\frac{r}{i}$  = jari-jari kelembaman per girasi (mm)

I = penampang inersia ( $mm^4$ )

A = luas penampang elemen tekan ( $mm^2$ )

Persyaratan angka kelangsingan  $\leq 200$ . Semakin besar angka kelangsingan, semakin kecil pula beban yang dapat dipikul.

Karena efek gaya tekan, maka biasanya dibutuhkan pengaku baja atau *steel stiffener* untuk mengurangi tekuk pada sumbu lemah penampang. Fenomena tekuk dibagi berdasarkan 2 kondisi:

- a. *Global buckling*, di mana angka kelangsingan struktur terlalu besar sehingga terjadinya tekuk di sepanjang batang pada bagian tertentu.
- b. *Local buckling*, fenomena tekuk yang terjadi pada bagian tertentu di penampang tekan dan disebabkan karena adanya perbedaan dari lebar penampang dan tebal dari elemen penampang (*web* dan *flange*).

**II.13.1 Tekuk Akibat Pengaruh Penampang (*Global Buckling*)**

Fenomena tekuk yang terjadi akibat pengaruh penampang dibagi menjadi 3 kondisi, yaitu:

- a. Tekuk lentur, terjadi pada penampang tekan yang tidak langsing.

$$P_n = f_{cr} \cdot A_g \dots \dots \dots (2-58)$$

Keterangan:

$P_n$  = kuat tekan nominal

$f_{cr}$  = tegangan kritis (MPa)

$A_g$  = luas kotor penampang ( $mm^2$ )

Untuk nilai tegangan kritis dihitung berdasarkan 2 kondisi:

- Apabila  $\lambda \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , maka tegangan kritisnya

$$f_{cr} = (0,658^{\frac{f_y}{f_e}}) \cdot f_y \dots \dots \dots (2-59)$$

- Apabila  $\lambda > 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , maka tegangan kritisnya

$$f_{cr} = 0,877 \cdot f_e \dots \dots \dots (2-60)$$

di mana,  $f_e$  adalah tegangan tekuk kritis elastis

$$f_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{(\frac{KL}{r})^2} \dots \dots \dots (2-61)$$

b. Tekuk torsi dan tekuk kombinasi (lentur dan torsi)

$$P_n = f_{cr} \cdot A_g \dots \dots \dots (2-62)$$

Untuk nilai tegangan kritis dihitung berdasarkan 2 kondisi:

- Bagi komponen struktur tekan siku ganda dan profil T

$$f_{cr} = \left(\frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4f_{cry}f_{crz}H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}}\right] \dots \dots \dots (2-63)$$

di mana,

$$f_{crz} = \frac{GJ}{A_g r_o^2} \dots \dots \dots (2-64)$$

$$f_{cry} = f_{cr} \text{ tekuk lentur} \dots \dots \dots (2-65)$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{r_o^2} \dots \dots \dots (2-66)$$

$$r_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} \dots \dots \dots (2-67)$$

- Bagi komponen struktur simetris ganda

$$f_e = \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \cdot \frac{1}{I_x + I_y} \dots \dots \dots (2-68)$$

- Bagi komponen struktur simetris tunggal di mana y adalah sumbu simetris

$$f_e = \left( \frac{f_{ey} + f_{ez}}{2H} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4f_{ey}f_{ez}H}{(f_{ey} + f_{ez})^2}} \right] \dots \dots \dots (2-69)$$

di mana,

$$f_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{K_y L}{r_y} \right)^2} \dots \dots \dots (2-70)$$

$$f_{ez} = \left( \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{A_g r_o^2} \dots \dots \dots (2-71)$$

Keterangan:

$C_w$  = konstanta pilin ( $mm^2$ )

$G$  = modulus elastis geser baja sebesar 77,200 MPa

$I_x, I_y$  = momen inersia di sumbu utama ( $mm^4$ )

$J$  = konstanta torsi ( $mm^4$ )

$K_y$  = faktor panjang efektif untuk tekuk lentur di sumbu y

$K_z$  = faktor panjang efektif untuk tekuk torsi

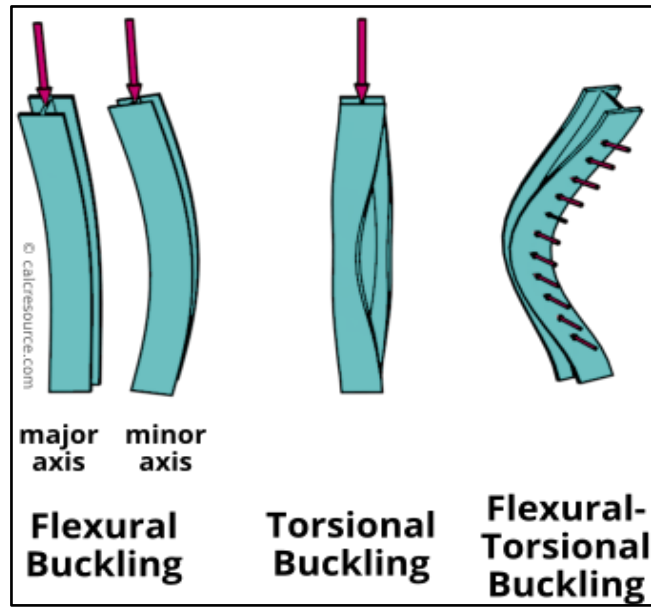
$r_o^2$  = radius girasi polar di pusat geser

$r_y$  = radius girasi di sumbu y (mm)

$x_o, y_o$  = koordinat pusat geser dengan titik berat (mm)

Dari ketiga kondisi di atas, diambil hasil paling rendah sebagai kuat tekan nominal ( $P_n$ ).





Gambar II.31 Ilustrasi *Global Buckling* pada Elemen Tekan  
 (Sumber: Dr. Minas E. Lemonis, 2021)

#### II.14 Spesifikasi Baja untuk Jembatan Kereta Api

Berdasarkan *American Railway Engineering and Maintenance of way Association* (AREMA) tahun 2008 merekomendasikan bahwa untuk membangun sebuah jembatan kereta api, dibutuhkan kekuatan baja dengan tegangan leleh minimum ( $f_y$ ) sebesar 50 ksi atau 345 MPa. Berikut adalah tabel kekuatan baja yang dapat dipakai untuk jembatan kereta api dan dipilih sesuai dengan kebutuhan.

Tabel II.21 Mutu Baja untuk Struktur Jembatan Kereta Api

Mutu Baja (ASTM)	Tegangan Leleh ( $F_y - MPa$ )	Tegangan Putus ( $F_u - MPa$ )	Tebal Pelat Baja Maks. (inch)	Implementasi Bentuk Struktur
A36	250	400 – 550	6	Semua
A709, Grade 36	250	400 – 550	4	Semua
A588 <sup>1</sup>	345	$\geq 485$	4	Semua
A709, Grade 50W <sup>1</sup>				
A709, Grade HPS 50W <sup>1</sup>				
A588 <sup>1</sup>	315	$\geq 460$	4 – 5	Semua

A588 <sup>1</sup>	290	$\geq 435$	5 – 8	-
A992	345	$\geq 450$	-	Semua
A709, Grade 50S				
A572, Grade 50	345	$\geq 450$	4	Semua
A709, Grade 50				
A572, Grade 42	290	$\geq 415$	6	Semua
A709, Grade HPS 70W <sup>1</sup>	485	585 – 760	4	-
<sup>1</sup> merupakan jenis baja yang memiliki ketahanan korosi yang baik sehingga tidak perlu dicat				

(Sumber: AREMA, 2008)

Untuk memenuhi standar kekuatan (*strength*), daktilitas (*ductility*), *fracture toughness*, tahan korosi (*corrosion resistance*), dan sifat mampu las (*weldability*) pada jembatan kereta api, *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA) merekomendasikan baja berdasarkan mutunya dengan penjelasan sebagai berikut:

- Tegangan leleh  $> 50$  ksi atau 345 MPa hanya ASTM A709 HPS 70W
- Baja yang memiliki sifat tahan korosi, yaitu ASTM A588 dan A709
- Baja yang tidak memiliki sifat tahan korosi sehingga dibutuhkan pengecatan, yaitu ASTM A36, A572 Grade 42, dan A572 Grade 50.

Tegangan leleh  $> 50$  ksi atau 345 MPa hanya dapat digunakan untuk konstruksi menggunakan sambungan baut saja.

## II.15 Komponen dari Struktur Atas Jembatan Kereta Api

Komponen-komponen utama yang terdapat pada struktur atas jembatan kereta api dan memiliki fungsinya masing-masing adalah sebagai berikut (Civeng, 2015):

### 1. Gelagar memanjang atau *stringer*

Batang yang searah dengan arah memanjangnya jembatan yang membantu untuk mendukung dan menopang beban kereta api yang lewat di atasnya, serta mendistribusikan beban tersebut ke gelagar melintang dan rangka batang.

### 2. Gelagar melintang atau *floorbeam*

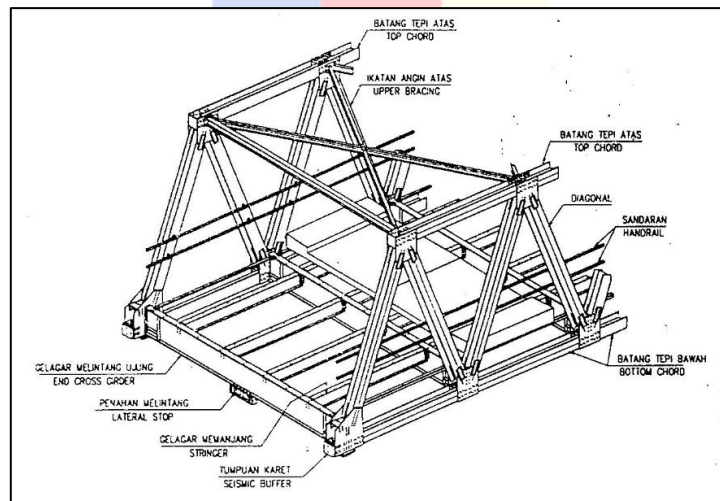
Batang yang tegak lurus dengan arah memanjangnya jembatan yang membantu untuk menahan beban yang didistribusikan dari gelagar memanjang, serta menjadi pengikat gelagar memanjang dan menjaga agar gelagar memanjang tidak mengalami tekuk torsi lateral (*lateral torsional buckling*).

3. Rangka batang atau *truss*

Batang-batang yang tersusun menjadi rangka yang berbentuk segitiga dan beban-beban disalurkan yang menghasilkan gaya aksial berupa tarik dan tekan (Nicholas Hadi, 2018).

4. Ikatan angin atau *bracing*

Batang yang dapat memberikan stabilitas pada struktur utama, serta menahan beban angin dan gaya lateral yang terjadi pada jembatan sehingga menjadi lebih kaku (American Institute of Steel Construction, 2022).



Gambar II.32 Komponen dari Struktur Atas Jembatan Kereta Api

(Sumber: Helori, 2019)

## II.16 Posisi Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pembangunan jembatan rangka batang baja adalah perencanaan awal, desain *preliminary*, menganalisis gambar dan kekuatan, dan desain final (Andrew Wicaksono, 2007). Panduan desain *preliminary* jembatan rangka batang baja dapat menggunakan pedoman dari gambar yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga mengenai “Gambar

Standar Rangka Baja Bangunan Atas Jembatan Kelas A dan B”. Pedoman ini dapat menjadi panduan untuk mendesain kekuatan dari profil baja yang akan dicari dan juga sambungan baut yang akan didesain.

Perhitungan yang dihitung, khususnya untuk struktur atas terdiri dari perhitungan gelagar jembatan, ikatan angin, rangka jembatan, dan apabila ada, maka dihitung juga pelat lantai dan landasan pada jembatan. Pada perhitungan kekuatan struktur mempertimbangkan beban-beban sebagai berikut (Andrew Wicaksono, 2007):

1. Muatan primer yang terdiri dari beban tetap atau beban sendiri, beban bergerak atau hidup dan beban kejutnya;
2. Muatan sekunder yang terdiri dari beban angin, dan;
3. Muatan khusus yang terdiri dari beban gempa bumi dan beban saat pelaksanaan.



Tabel II.22 Posisi Penelitian

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
1.	Andrew Wicaksono dan Arif Kurniawan (2007)	Perencanaan Jembatan Rangka Baja Kaligarang Sisemut Kabupaten Semarang	Menganalisis perhitungan struktur, perkerasan, RKS, RAB, <i>time schedule, network planning, kurva S</i> , dan gambar-gambar perencanaan	Perencanaan, perhitungan struktur atas, bawah, dan oprit, gambar jembatan, rencana kerja, syarat-syaratnya, analisa harga, dan <i>time scheduleny</i>	Untuk struktur atas, penampang gelagar memanjang menggunakan WF 450.200.9.14, gelagar melintang WF 800.300.16.30, balok komposit, <i>stud connector</i> dengan diameter 35 mm, ikatan angin atas dan bawah L 200.200.16. Jumlah sambungan gelagar memanjang dan melintang sebanyak 4 D19, ikatan angin dengan rangka 4 D16 dan ukuran las 6 mm, batang horizontal rangka 24 D25, batang diagonal rangka 10 D16, sambungan memanjang gelagar melintang 10 D19, dan sambungan gelagar melintang dengan rangka 24 D19.	Cara mencari kuat tahanan nominal dari profil-profil, serta sambungan baut yang sesuai
2.	Badriana Nuranita, Erma Desmaliana,	Evaluasi Perencanaan Jembatan Kereta Api	Menganalisis tegangan, lendutan struktur, dan pengecekan	Studi pustaka, pemilihan tipe bangunan, pengumpulan data material, permodelan	Penampang gelagar melintang menggunakan H 1451x420x19x28/32 dengan kuat nominal lentur 8115 kN.m dan kuat nominal geser 3965 kN, batang	Pembebanan yang dipakai spesifik terhadap jembatan kereta api

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
	Kenny Gesa (2020)	Rangka Baja Double Track Tipe Welded Through Truss Bentang 50 meter	kapasitas penampang	struktur dengan <i>software</i> MIDAS Civil, memasukkan pembebanan berdasarkan PM 60 Tahun 2012, mengontrol lendutan dan rasio tegangan, pengecekan kapasitas penampang, dan menganalisis struktur akibat pembebanan.	tepi atas menggunakan Box 382x620x25x28 dengan kuat tekan nominal 12340 kN, dan batang tepi bawah menggunakan Box 388x620x19x22 dengan kuat tarik nominal 8888 kN.	
3.	Yosafat Aji Pranata dan Kevin Almuhihsyah (2016)	Struktur Jembatan Rangka Batang Kayu Kelapa	Inovasi mengenai pembuatan jembatan rangka batang dengan material kayu kelapa dengan pelat penyambung baja dan alat sambung mekanis baut	Mencari pembebanan pada struktur berdasarkan RSNI-T-02-2005, permodelan struktur jembatan dengan SAP2000, dan persyaratan deformasi maksimum berdasarkan SNI 7973:2013	Jembatan memenuhi persyaratan izin dengan pengecekan seluruh batang yang menyalurkan gaya tarik dan tekannya, serta tidak melebihi kapasitasnya. Jembatan dapat dilewati dengan pejalan kaki, sepeda motor, sepeda, dan mobil.	Pemodelan yang digunakan sama-sama menggunakan aplikasi SAP2000 dan pengecekannya sama-sama mengenai batang tarik-tekan, serta deformasinya

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
4.	Muhammad Ridha dan Khairul Miswar (2016)	Perencanaan Struktur Rangka Atas Jembatan Rangka Baja pada Gampong Leubok Pempeng Kecamatan Peureulak Kabupaten Aceh Timur	Merencanakan jembatan rangka baja agar aman terhadap beban-beban yang bekerja pada jembatan dan menggunakan metode matriks untuk menghitung gaya batang.	Penggolongan kelas jembatan, menentukan besar pembebanan pada jembatan, perencanaan sandaran, pelat lantai dan trotoar, gelagar, ikatan angin, rangka batang, sambungan, dan pelat buhul	Perencanaan struktur jembatan rangka baja menggunakan sandaran hollow diameter 48.6 mm, tebal 3.7 mm, dan berat 4,10 kg/m. Trotoar dengan lebar 0,5 m dan tinggi 0,25 m, pelat lantai dengan tebal 20 cm, gelagar memanjang menggunakan profil H 350x175x7x11 dengan mutu BJ37 dengan berat 49,56 kg/m. Gelagar melintang menggunakan profil H 488x300x11x18 berat 128,35 kg/m. Ikatan angin atas dan bawah menggunakan profil L 125x125x12 dengan berat 22,67 kg/m. Rangka utama menggunakan profil H 300x300x10x15 dengan berat 94,04 kg/m. Sambungan baut menggunakan diameter 1 inch dan 0,5 inch dengan mutu A325 dan tebal pelat 20 mm. Lendutan yang terjadi pada jembatan adalah 3,12 cm.	Menggunakan jenis sambungan yang sama, yaitu sambungan baut dan menggunakan garis pengaruh untuk mencari gaya pada masing-masing batang.

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
5.	Endah Atika (2018)	Analisis Variasi Tinggi Rangka Batang pada Jembatan Rangka Baja Tipe Pratt	Menganalisis perbedaan tinggi batang vertikal dan tipikal permodelan terhadap respon struktur masing-masing model jembatan, berat, dan lendutan struktur	Menentukan masalah dari hasil studi literatur, mendesain awal jembatan, menghitung pembebanan, menghitung struktur menggunakan SAP2000 dan <i>Microsoft Excel</i> , dan menganalisis perbandingan hasil perhitungan	Gaya dalam semakin menurun dengan bertambahnya tinggi batang vertikal dan menyebabkan berat struktur semakin kecil. Namun, pemilihan profil juga berpengaruh. Semakin tinggi juga nilai lendutannya akan semakin kecil karena menambahkan nilai kekakuan dari struktur tersebut.	Menggunakan aplikasi SAP2000 untuk menganalisis kekuatan dan <i>Microsoft Excel</i> untuk mencocokkan dengan hasil perhitungan pada aplikasi struktur. Cara perhitungan kekuatan juga sama <i>step by step</i> , yaitu menganalisis geser, lentur, tekan, dan tarik.
6.	Algazt Aryad Masagala (2022)	Desain Struktur Jembatan Kereta Api Tipe <i>Concrete</i>	Memperoleh dimensi dan kebutuhan penulangan, serta besar nilai	Observasi lapangan, pengumpulan data, data primer dan sekunder, pemodelan jembatan menggunakan SAP2000,	Lendutan maksimum sebesar 55,990 pada jembatan kereta api BH 1828 tipe <i>through arch</i> yang telah memenuhi syarat lendutan izin, yaitu $L/800$ .	Menggunakan pembebanan dan kombinasi pembebanan yang serupa karena



No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
		<i>Through Arch: Studi Kasus Jembatan Kereta Api BH 1828 Purworejo</i>	lendutan dengan mengacu pada PM No. 60 Tahun 2012	menggambar <i>frame</i> sesuai rencana, memasukkan beban yang bekerja, mendapatkan nilai gaya dalam dan lendutan, dan merencanakan dimensi dan analisis kebutuhan tulangan.		menggunakan sumber yang sama, yaitu PM No. 60 Tahun 2012.
7.	Tri Muspitasari, Indah Sulistyowati, dan Widi Kumara (2017)	Evaluasi Peraturan Pembebanan Gandar Kereta Api di Pulau Jawa Terhadap Kondisi Aktual	Mengevaluasi pengaruh pembebanan skema Rencana Muatan 1921 dengan beban aktual (pulau Jawa) karena peraturan RM 1921 yang sudah lama dan belum ada <i>update</i>	Pengumpulan data, data pembebanan RM 1921 dan aktual di pulau Jawa, parameter, menganalisis skema pembebanan RM 1921 dan aktual, dan membandingkannya.	Gaya dalam RM 1921 pada 10 beban gandar yang memiliki masing-masing berat sebesar 12 ton memiliki perbedaan 30,38% lebih besar daripada aktual. Gaya dalam maksimum kondisi aktual menghasilkan berbedanya gaya-gaya dalam dan hasilnya lebih kecil dari gaya dalam RM 1921.	Membuktikan bahwa rencana muatan 1921 masih valid sampai sekarang sehingga dapat dipakai untuk proyek akhir ini.

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
8.	Santi Yatnikasari, Muhammad Noor Asnan, dan Ulwiyah Wahdah Mufassirin Liana (2021)	Alternatif Perencanaan Jembatan Rangka Baja Dengan Menggunakan Metode LRFD di Jembatan Gelatik Kota Samarinda	Perencanaan menggunakan LRFD dengan asumsi bahwa metode ini memberikan kelebihan daripada metode sebelumnya	Studi pendahuluan, latar belakang, rumusan masalah, tujuan perencanaan, perhitungan perencanaan, dan gambar perencanaan.	Plat lantai trotoar dengan panjang 39 m, lebar 0.5 m, jumlah 2 buah, tulangan pokok D18-100 mm dan tulangan sengkang D8-100 mm. Plat lantai kendaraan dengan panjang 39 m, lebar 7 m, tebal 0.2 m, tulangan pokok D18-100 mm, dan tulangan sengkang D8-100 mm. Dimensi gelagar memanjang WF 12x31, gelagar melintang WF 27x145, dan gelagar induk WF 300x300x12x12. Dimensi ikatan angin atas diagonal L 75x75x10, vertikal WF 5x16, dan ikatan angin bawah L 90x90x11.	Profil gelagar sama-sama menggunakan profil WF, menggunakan SNI 1729:2015 untuk mencari kekuatan baja dan sambungan.
9.	Yoga Afri Sugara, Wardi, dan Afrizal Naumar (2022)	Perencanaan Jembatan Rangka Baja Tipe Warren Truss Di Kota Padang	Merencanakan dan menganalisis jembatan dengan menggunakan perhitungan dari data konstruksi.	Pengumpulan literatur, gambar konstruksi jembatan, perhitungan struktur atas, seperti pelat dek kendaraan, balok jembatan, penyangga angin, dan rangka utama,	Pelat lantai tebal 22 cm, profil gelagar memanjang WF 350x350x19x19, gelagar melintang WF 800x300x1630, ikatan angin atas WF 150x150x7x10, strut WF 200x200x12x12, dan rangka induk WF 400x400x30x50. Bangunan bawah jembatan dengan <i>abutment</i>	Profil gelagar dan rangka memakai baja WF dan memakai baut sebagai sambungan geser,

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
				serta struktur bawah, seperti penyangga dan pondasi.	dengan lebar 4.4 m, tinggi 8.14 m, dan panjang 8 m.	
10.	Anis Massaroh (2014)	Perhitungan Struktur Jembatan Rangka Bentang 60 Meter di Samboja Kabupaten Kutai Kartanegara	Menghitung dan merencanakan jembatan rangka, serta sesuai dengan wilayah tersebut	Pengumpulan data, perhitungan pembebanan lantai kendaraan, perhitungan struktur atas, perhitungan rangka, dan perhitungan struktur bawah.	Jembatan rangka baja memiliki bentang 60 meter, lebar 9 meter, lebar lantai kendaraan 2 x 3,5 meter, dan lebar trotoar sebesar 1 meter di kanan. Pipa sandaraan menggunakan bahan baja diameter 76,3 mm, lantai trotoar menggunakan bahan beton bertulang tebal 25 cm, mutu beton 25 MPa, tulangan D12, dan mutu baja 240 MPa. Pelat lantai berbahan beton bertulang, tebal 25 cm, mutu beton 30 MPa, tulangan D16, mutu baja 390 MPa, deck baja tebal 0,5 cm, dan mutunya 300 MPa. Gelagar memanjang memakai WF 450.200.9.14, gelagar melintang memakai WF 900.300.18.34, stud connector 282 buah sepanjang bentang,	Bentang jembatan yang ditinjau sama-sama 60 meter dan bentuk rangka batang, dengan menggunakan rangka profil WF.

No.	Penulis dan Tahun Penulisan	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Korelasi dengan Proyek Akhir
					ikatan angin L 150.150.18 dengan mutu baja 240 MPa. Rangka baja WF 400.400.20.35.	

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2023)

