

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Umum**

Dengan negara yang mempunyai 38 pulau yang menjadikan Indonesia negara kepulauan terbesar di dunia. Karena Indonesia terletak di dekat garis khatulistiwa, Indonesia menikmati sinar matahari sepanjang tahun. Indonesia terletak di antara benua besar Asia dan Australia. Mengingat keadaan ini samudra hindia dan pasifik yang merupakan salah satu samudra terluas yang mengapit Indonesia. Beberapa sebaran sungai terpanjang di Indonesia terdapat di Pulau Jawa, antara lain Sungai Citarum sepanjang 270 km, Sungai Bengawan Solo sepanjang 600 km, dan Sungai Brantas sepanjang 320 km. Sebaran sungai panjang lainnya terdapat di Pulau Kalimantan, antara lain Sungai Kapuas sepanjang 1.143 km, Sungai Mahakam sepanjang 920 km, dan Sungai Barito sepanjang 900 km. Dengan kondisi geografis yang beragam yang dipisahkan oleh lembah dan sungai, konektivitas antar wilayah sangat bergantung pada struktur sipil yang dikenal sebagai jembatan.

Jembatan adalah struktur yang menghubungkan area yang tidak sebidang dan lebih rendah biasanya jalur lalu lintas atau sungai (Struyk dan Veen, 1984). Perencanaan dan perancangan struktur jembatan harus mempertimbangkan fungsi transportasi, persyaratan teknik, dan estetika arsitektural. Proses perencanaan jembatan mempertimbangkan sejumlah faktor, termasuk faktor teknis dan ekonomi yang dimodifikasi berdasarkan persyaratan dan kaidah yang berlaku. Berbagai jenis dan bentuk material jembatan telah berkembang seiring berjalannya waktu sebagai respons terhadap perkembangan terkini dalam ilmu pengetahuan dan teknologi bangunan.

#### **2.2. Klasifikasi Jembatan**

Selama ini telah banyak terjadi modifikasi jenis jembatan menurut fungsi, lokasi, bahan bangunan, dan jenis strukturnya seiring dengan perkembangan teknologi. Beragamnya jenis jembatan disebabkan oleh semakin beragamnya kondisi lapangan yang kompleks dan semakin canggihnya teknologi. Berikut beberapa klasifikasi jembatan. Berdasarkan fungsinya seperti Jembatan jalan raya

(*highway bridge*), Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*), dan Jembatan pejalan kaki atau penyebrangan orang (*pedestrian bridge*). Berdasarkan lokasinya seperti Jembatan diatas sungai, danau atau laut, Jembatan diatas lembah, Jembatan diatas jalan yang ada (*flyover*), Jembatan diatas saluran irigasi/drainase (*culvert*), dan Jembatan di dermaga (*jetty*). Berdasarkan bahan konstruksinya seperti Jembatan kayu (*log bridge*), Jembatan beton (*concrete bridge*), Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*), Jembatan baja (*steel bridge*), Jembatan komposit (*composite bridge*). Berdasarkan tipe strukturnya seperti, Jembatan pelat (*slab bridge*), Jembatan pelat berongga (*voided slab bridge*), Jembatan gelagar (*girder bridge*), Jembatan rangka (*truss bridge*), Jembatan pelengkung (*arch bridge*), Jembatan gantung (*suspension bridge*), Jembatan kabel (*cable stayed bridge*), dan Jembatan kantilever (*cantilever bridge*).

### **2.3. Definisi Jembatan Pelengkung (*Arch Bridge*)**

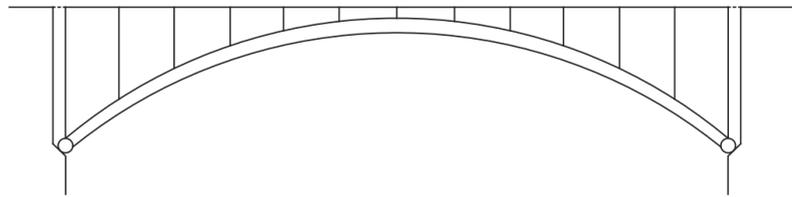
Jembatan dengan abutment pada kedua sisinya yang menyerupai struktur setengah parabola disebut jembatan pelengkung. Rangka utama jembatan yang dikenal sebagai struktur setengah parabola bertanggung jawab untuk menopang semua gaya yang diterapkan pada struktur jembatan. Secara teori, beban vertikal yang bekerja dapat menyebabkan respons horizontal ketika jembatan pelengkung dibangun. Beban yang ditopang oleh rantai kendaraan jembatan akan dipindahkan melalui desain lengkung ke abutmen, sehingga mencegah kedua sisi jembatan bergeser ke arah yang berlawanan.

### **2.4. Jenis-Jenis Jembatan Pelengkung**

Berdasarkan dengan bentuk jembatan pelengkung dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori (O'Connor 1971). Dalam keadaan tertentu, jembatan pelengkung dapat dikategorikan berdasarkan cara komponen-komponennya disusun secara struktural, menurut perletakan hanger dll. Berikut ini adalah beberapa kategori untuk berbagai jenis jembatan pelengkung:

a. *Deck arch bridges*

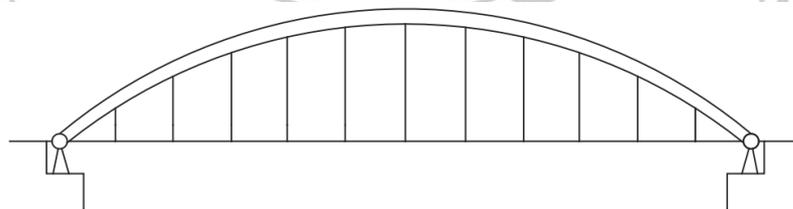
Jembatan Memiliki lantai kendaraan di atas puncak jembatan pelengkung, beban disalurkan langsung ke pelengkung melalui sprandel. Karena beban lalu lintas di atasnya, jembatan jenis ini dapat menahan gaya aksial dan lentur. Jembatan jenis ini adalah jenis pelengkung yang ideal untuk melintasi area yang terbuat dari batu gunung atau beton. Sparandel adalah jarak yang ada antara pelengkung dan lantai mobil. Pemilihan jembatan ini juga dipengaruhi oleh jenis tanah yang cukup untuk memungkinkan perletakan jepit pada struktur tersebut.



Gambar 2. 1 *Deck Arch Bridge*  
(sumber: Chen dan Duan,2014)

b. *Through arch bridges*

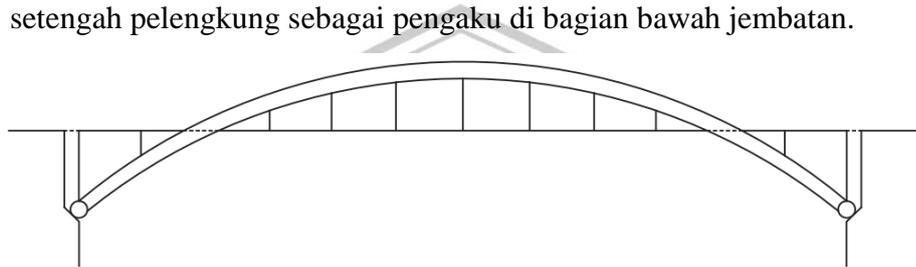
Jembatan pelengkung tipe *Through arch bridge* adalah jembatan dengan lantai kendaraan di antara springline pelengkung. Biasanya, girder jembatan dipasang ke pelengkung melalui hanger dengan tali atau kabel. Seringkali pemilihan jembatan jenis ini didasarkan pada kondisi tanah yang buruk. Girder jembatan biasanya menggunakan girder box baja atau girder beton yang dipress, tergantung pada kekakuan beban.



Gambar 2. 2 *Through Arch Bridge*  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)

c. *A-Half – Through arch bridges*

Jembatan pelengkung tipe A-Half through arch memiliki dek yang terletak di antara ketinggian pelengkung. Jenis jembatan ini memiliki setengah pelengkung di atas dan di bawah dek, sehingga lantai kendaraan berada di antara puncak pelengkung dan kaki pelengkung. Dalam situasi seperti ini, perubahan biasanya dilakukan dengan menambahkan struktur setengah pelengkung sebagai penyangga di bagian bawah jembatan.



Gambar 2. 3 *A Half Through Arch*  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)

## 2.5. Tata Cara Pemilihan Jembatan

Dalam merencanakan suatu struktur jembatan sangat penting untuk meninjau dan memperhitungkan keadaan setempat serta bentang yang tepat untuk tahap desain/desain awal (*preliminary desain*). Berdasarkan tipe dan bentang jembatan ditemukan proses yang efisien dan sensibel untuk memilih bentuk jembatan adalah sebagai berikut. (*bridge engineering, classification, design loading, and analysis methods 2017*).

Structural form	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	250	300	350	400	450	500	1000	1500	2000			
Steel bridges	Simply supported I-girder		✓	✓	✓																						
	Continuous I-girder			✓	✓	✓																					
	Simply supported box-girder					✓	✓	✓																			
	Continuous box-girder					✓	✓	✓	✓																		
	Simply supported truss							✓	✓	✓																	
	Continuous truss																									440 m	
	Cantilever truss																									549 m	
	Arch bridge																									552 m	
	Cable stayed bridge																										1104 m
	Suspension bridge																										1991 m
Concrete bridges	RC simply supported I-girder		✓	✓																							
	PC pretension girder		✓	✓																							
	PC post-tension girder		✓	✓	✓	✓																					

Gambar 2. 4 Tata Cara Praktik Pemilihan Tipe Jembatan Berdasar Bentang Jembatan  
(sumber: *Bridge engineering, classification, design loading, and analysis methods 2017*)

## 2.6. Bagian Struktur Atas Jembatan Pelengkung

Dalam Bagian struktur atas suatu jembatan pelengkung ditemukan komponen pendukung yang terdapat pada struktur atas (*superstructure*). Dalam penyusunan tugas akhir ini berikut elemen struktur atas dari jembatan pelengkung *Through Arch* seperti Trotoar dan parapet, Tiang railing dan pipa sandaran, Lantai kendaraan jembatan, Gelagar memanjang, Gelagar melintang/diafragma, Ikatan angin, Batang penggantung/*hanger*, Rangka pelengkung utama, dan Tumpuan/bearing serta Sambungan.

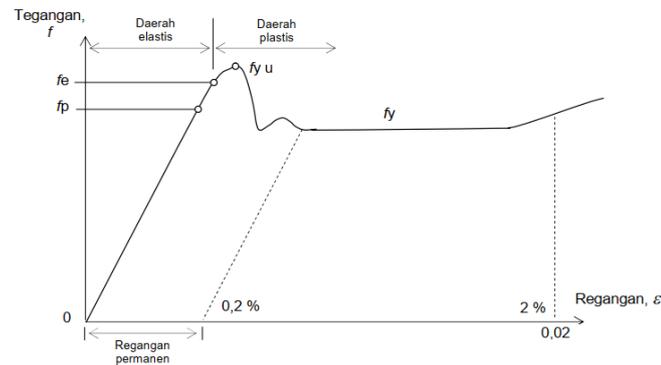
## 2.7. Karakteristik Material

Untuk jembatan pelengkung tipe *Through Arch* yang menggunakan material penyusun seperti baja atau beton, sangat penting untuk mengetahui perilaku material tersebut terhadap hasil pengujian yang diperlukan.

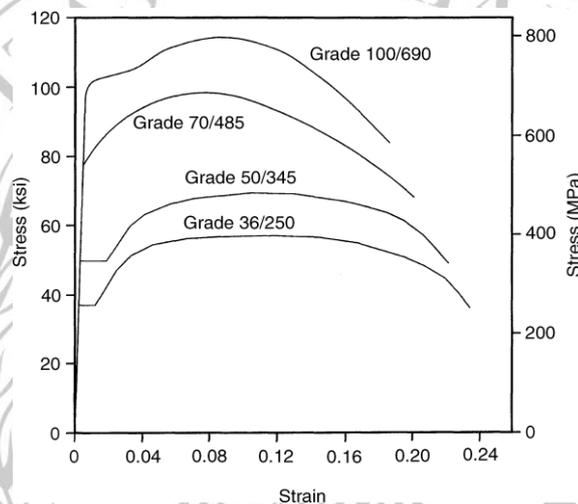
### 2.7.1. Baja (Steel)

Perencanaan struktur harus memenuhi syarat kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Kekuatan struktur sangat terkait dengan jumlah tegangan yang dapat dipikul tanpa mengalami deformasi (*yielding*) atau patah (*split*). Tegangan leleh ( $F_y$ ) dan tegangan akhir/ultimate ( $F_u$ ) adalah parameter yang diperhatikan. Faktor kekakuan adalah besarnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan satu unit deformasi, yang diukur dengan modulus elastisitas. Faktor daktilitas adalah hubungan antara besarnya deformasi sebelum keruntuhan, yang merupakan faktor penting dalam perencanaan struktur dengan tekanan tak terduga atau sulit diprediksi. Jadi, ketika Anda memilih material untuk konstruksi berdasarkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas, jelas bahwa baja lebih baik daripada beton atau kayu. Baja juga merupakan produk turunan industri, sehingga kualitasnya dapat dikontrol dan diproduksi dengan baik.

Kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  yang biasa digunakan dalam perencanaan struktur, digunakan untuk mengukur karakteristik material baja. Data pengujian (P- $\Delta$ ) dikonversi ke data geometri (A dan L) kondisi awal untuk mendapatkan kurva. Parameter dapat dihitung berdasarkan kurva berikut:



Gambar 2. 5 Parameter Penting Kurva  $\sigma$ - $\epsilon$   
(sumber: diktat struktur baja UGM, 2016)

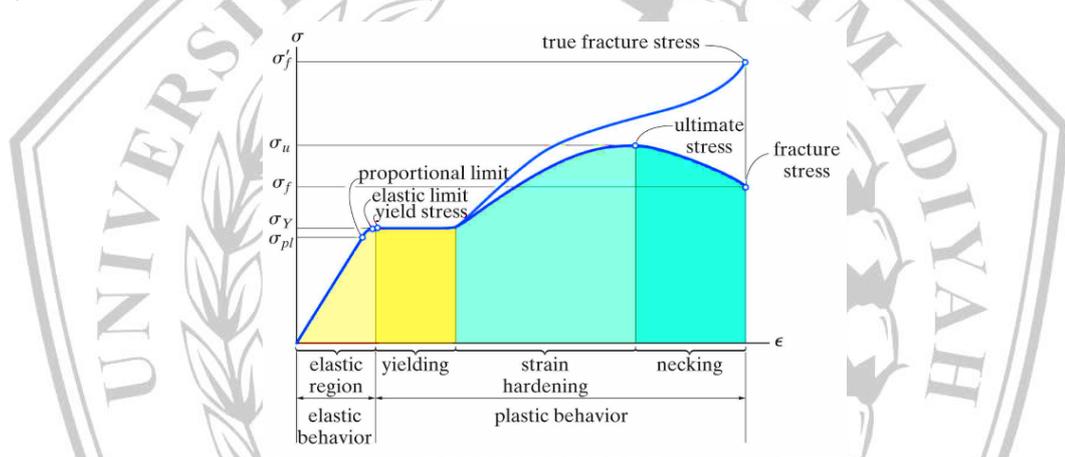


Gambar 2. 6 Kurva Stress-Strain Beberapa Jenis Material  
(sumber: Barker, 2007)

Kurva *stress-strain engineering*, juga dikenal sebagai kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  atau kurva tegangan-regangan saja. Pada kurva tersebut, segmen OA berbentuk garis lurus, dan kemiringannya adalah modulus elastis, yang diwakili oleh konstanta numerik  $E = \sigma/\epsilon$ , yang menunjukkan besarnya kekakuan elastis. Jika kerusakan tidak permanen, kondisi elastis dapat kembali ke kondisi awalnya jika beban dihilangkan. Akibatnya, batas elastis biasanya disamakan dengan batas proporsional. Jika batas elastis tercapai, kondisi menjadi plastis; jika tidak, kondisi menjadi inelastis, di mana kerusakan akan bersifat permanen. Kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  berasal dari hasil pengujian yang tidak memiliki titik regangan leleh yang jelas. Oleh karena itu, untuk menentukan, garis bantu baru sejajar OA harus dibuat dengan *offset* 0,2% (0,002),

sampai kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  memotong di titik  $f_y$ . Pada titik inilah yang dianggap sebagai tegangan leleh atau tegangan kuat leleh.

Jika diamati, karakteristik perilaku material baja konstruksi hampir identik, bahkan dalam kondisi elastis. Ketika kondisi inelastis, atau leleh, muncul, perubahan baru akan muncul. Oleh karena itu, kuat leleh ( $f_y$ ) dan kuat tarik ( $f_u$ ) material baja menentukan kualitasnya. Daktilitas struktur dipengaruhi oleh fenomena leleh, yang dapat menyebabkan redistribusi tegangan saat inelastis. Oleh karena itu, baja yang memiliki kemampuan leleh yang rendah harus dihindari ketika digunakan di area yang berpotensi mengalami inelastis (gempa). Oleh karena itu, analisis plastis hanya diperbolehkan untuk baja dengan mutu hingga 450 MPa (AISC 2010 dan AASHTO 2017).



Gambar 2. 7 Kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  Tipikal Baja Konstruksi  
(sumber: engrzohaibahmed.com)

Modulus elastis ( $E$ ) untuk semua jenis baja adalah 200.000 MPa, dan modulus tangent kondisi strain-hardening adalah sekitar 1/30 kali kondisi elastisitasnya, atau 6700 MPa. Kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  menunjukkan baja mutu biasa dengan kondisi leleh yang jelas, ditunjukkan oleh segmen horisontal pada kurva. Kondisi elastis dibatasi sampai tegangan leleh. Dengan kata lain, jika kondisi tegangan ditetapkan konstan, hanya ada peningkatan tegangan sampai terjadi strain-hardening. Jika beban diteruskan, tegangannya akan meningkat sampai meleleh sepenuhnya. Ini dikenal sebagai kuat tarik atau kuat batas (ultimate)  $f_u$ . Sifat mekanis dari material baja harus memenuhi persyaratan minimum seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut (RSNI T-03-2005) saat direncanakan.

Tabel 2. 1 Sifat Mekanis Baja

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

Sumber : RSNI T-03-2005

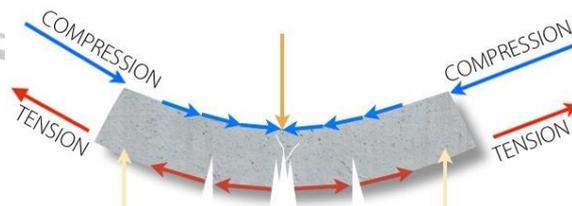
Tabel 2. 2 Sifat Mekanis Baja lainnya

Indikator	Nilai
Modulus elastisitas ( $E$ )	200.000 Mpa
Modulus geser ( $G$ )	80.000 Mpa
Angka poisson ( $\mu$ )	0,3
Koefisien pemuaian ( $\alpha$ )	$12 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$

Sumber : RSNI T-03-2005

### 2.7.2. Beton (Concrete)

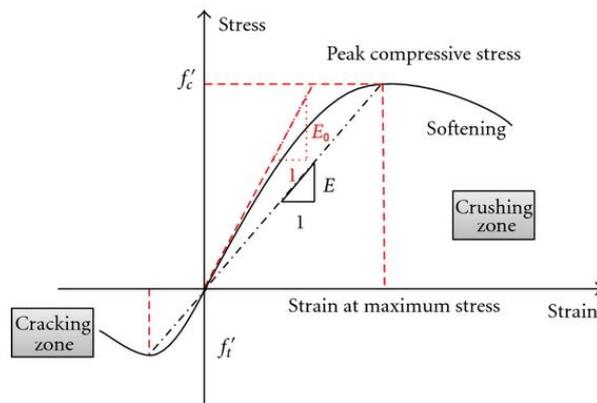
Beton (*concrete*) adalah material konstruksi yang paling umum digunakan di Indonesia. Material beton adalah campuran agregat kasar dan halus yang diikat oleh campuran komposisi kimia seperti semen. Karena banyaknya agregat yang tersedia di alam, material ini sangat digunakan di Indonesia. Beton umumnya memiliki daya tahan tekan yang tinggi dan daya tarik yang rendah. Kuat tekan beton bervariasi tergantung pada perbandingan campuran antara semen, agregat kasar, agregat halus, dan air; jenis campuran (admixures) yang berbeda; waktu penyelesaian; dan kualitas perawatan. Faktor air semen, juga dikenal sebagai FAS, adalah komponen penting dalam menentukan kekuatan beton. Kekuatan uji yang tersedia dianggap 80 persen dari kekuatan uji yang terjadi untuk beton biasa (ACI, 2014).



Gambar 2. 8 Proses Transfer Gaya yang Terjadi Pada Beton  
(sumber: [civilengineeringforum.me](http://civilengineeringforum.me))

Uji tarik beton menggunakan tes pembelahan silinder biasanya mencakup 10% hingga 20% dari kuat tekan yang tersedia. Modulus elastisitas beton tidak

hanya bergantung pada mutunya, tetapi juga dipengaruhi oleh umur, jenis agregat dan semen, kecepatan pembebanan, dan ukuran benda uji. Karakteristik beton biasanya digambarkan dalam diagram regangan konvensional, di mana modulus awal beton dianggap linear atau dikenal sebagai modulus tangen.



Gambar 2. 9 Diagram Tipikal Tegangan dan Regangan Uji Tarik dan Tekan Beton (sumber: hindawi.com)

Modulus elastis beton biasanya 25% hingga 50% dari kekuatan hancur ( $f_c$ ). Ketika beton mendekati 70% kekuatan hancur ( $f_c$ ), dia kehilangan banyak kekuatan, sehingga diagram tegangan dan regangan tidak linear lagi. Setelah beban batas, terjadi retak yang searah dengan beban yang menghancurkan benda uji silinder, dan modulus elastis beton menurun drastis. Regangan batas umurnya berkurang.

## 2.8. Desain dengan Metode LRFD (Load Factor Resistance Design)

Konsep *Load Resistance Factor Design* (LRFD) pada struktur baja menyatakan bahwa beban yang digunakan pada LRFD adalah beban yang telah dikalikan dengan faktor tekanan tertentu yang diidentifikasi secara statistik dari hasil penelitian dan telah ditetapkan sebagai peraturan atau kode sesuai dengan peraturan yang berlaku. Tingkat resiko beban menentukan penggunaan faktor beban, jadi nilai faktor beban harus selalu lebih dari 1,0. Dalam hal kekuatan material dan struktur, juga perlu dilakukan pengurangan. Pengurangan kekuatan material dapat terjadi karena kesalahan dalam proses fabrikasi atau instalasi, dan faktor pengurangan kekuatan material selalu kurang dari 1,0. Secara plastis atau

elastis, analisis struktur dapat dilakukan. Namun, masih mengacu pada kondisi keadaan batas struktur (akhir) yang terdiri dari kondisi leleh, tekuk, dan putus/fraktur. Perencanaan struktur dan komponen dilakukan dengan mematuhi persyaratan berikut:

$$\phi R_n \geq \sum \eta_i \gamma_i Q_i \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

$R_n$  : adalah kuat nominal dari struktur, diambil dari skenario kegagalan (kondisi *ultimate*) yang paling mungkin terjadi.

$\phi$  : faktor keamanan untuk kekuatan nominal struktur (faktor reduksi struktur)

$\sum \eta_i \gamma_i Q_i$  : adalah kombinasi jenis beban yang dipikul oleh struktur rencana.

Dimana faktor keamanan diberlakukan baik terhadap beban maupun kekuatan struktur.

## 2.9. Pembebanan pada Jembatan

Standar pembebanan SNI 1725:2016 digunakan untuk merencanakan pembebanan jembatan yang disesuaikan dengan Spesifikasi Desain Jembatan AASHTO LRFD Edisi 8 2017, dan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dalam perencanaan jembatan, pembebanan harus mempertimbangkan aksi beban rencana yang digabungkan satu sama lain sesuai dengan kombinasi perencanaan yang diisyaratkan. Aksi yang terjadi pada jembatan akan memberikan gaya dalam struktur, dan berdasarkan hasil reaksi tersebut, dimensi rencana yang ekonomis dari jembatan dapat diperkirakan sesuai dengan beban yang bekerja. Oleh karena itu, persamaan yang ditetapkan dalam SNI 1725:2016 pasal 5 harus diterapkan saat menentukan faktor pembebanan dan kombinasi faktor pembebanan sebagai berikut:

$$Q = \sum \eta_i \gamma_i Q_i \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan mempertimbangkan hal-hal berikut ini:

Untuk beban-beban dengan nilai maksimum  $\gamma_i$ , maka faktor pengubah respon digunakan sebesar:

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0,95 \dots\dots\dots (2.3)$$

Untuk beban-beban dengan nilai minimum  $\gamma_i$  maka faktor pengubah respon digunakan sebesar:

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1 \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

$\eta_i$  : adalah faktor pengubah respon, termasuk daktilitas, redudansi dan kepentingan operasional

$\eta_D$  : adalah faktor pengubah respons berkaitan dengan daktilitas

$\eta_R$  : adalah faktor pengubah respons berkaitan dengan redudansi

$\eta_I$  : adalah faktor pengubah respons berkaitan dengan daktilitas

$\gamma_i$  : adalah faktor beban

$Q_i$  : adalah gaya yang bekerja pada jembatan

#### 1. Daktilitas

Jembatan harus diporsi untuk mencegah deformasi inelastis pada keadaan batas ekstrim dan ultimit sebelum kegagalan. Perangkat disipasi energi gempa dapat digunakan sebagai pengganti sistem pemikul beban gempa. Oleh karena itu, dalam perhitungan faktor pengubah respon, keadaan batas ultimit harus dipertimbangkan (SNI 1725:2016):

$\eta_D = 1,05$  (untuk komponen tidak daktil dan sambungan)

$\eta_D = 1,00$  (untuk perencanaan konvensional serta pedetailan yang mengikuti peraturan)

$\eta_D = 0,95$  (untuk komponen-komponen dan sambungan yang telah dilakukan tindakan tambahan untuk meningkatkan daktilitas lebih dari peraturan yang diisyaratkan pada peraturan ini)

$\eta_D = 1,00$  (untuk keadaan batas lain yang termasuk keadaan batas ekstrim/gempa)

#### 2. Redudansi

Kecuali ada alasan yang kuat untuk tidak menggunakan struktur tersebut, jenis pembebanan yang terjadi secara terus menerus harus digunakan. Dalam hal keadaan batas ultimit, maka:

$\eta_R = 1,05$  (untuk komponen no redundan)

$\eta_R = 1,00$  (untuk komponen dengan redudansi konvensional)

$\eta_R = 0,95$  (untuk komponen dengan redudansi melampaui kontinuitas girder dan penampang torsi tertutup)

$\eta_R = 1,00$  (untuk keadaan batas lain yang termasuk keadaan batas ekstrim/  
gempa)

### 3. Kepentingan operasional

Otoritas yang berwenang terhadap jaringan transportasi harus mengidentifikasi jenis kepentingan operasional dan mengidentifikasi kebutuhan operasional berikut:

Untuk keadaan batas ultimit maka:

$\eta_I = 1,05$  (untuk jembatan penting atau sangat penting)

$\eta_I = 1,00$  (untuk jembatan tipikal)

$\eta_I = 0,95$  (untuk jembatan kurang penting)

$\eta_I = 1,00$  (untuk jembatan kurang penting)

#### 2.9.1. Beban Permanen

Berdasarkan AASHTO 2017, beban permanen termasuk komponen struktur, beban mati tambahan atau utilitas, overlay aspal jembatan, rencana pelebaran jembatan (*planned widenings*), dan beban penyusun jembatan yang tetap atau tidak berubah. Kerapatan massa memberikan unit  $\text{kg/m}^3$  dan  $\text{kg/mm}$ , dan untuk mengubah satuan menjadi  $\text{N/m}^3$ , kerapatan massa harus dikalikan dengan percepatan gravitasi  $g = 9,8066 \text{ m/sec}^2$ , yang merupakan satuan newton. Tabel 2.3 menjelaskan besarnya kerapatan massa material secara umum.

Tabel 2. 3 Berat Isi dan Kerapatan Massa Beban Permanen

No	Bahan	Berat isi ( $\text{kN/m}^3$ )	Kerapatan Massa ( $\text{Kg/m}^3$ )
1	Lapisan permukaan beraspal ( <i>bituminous wearing coarse</i> )	22	2245
2	Besi Tuang ( <i>cast iron</i> )	71	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan ( <i>compacted sand, silt or clay</i> )	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan ( <i>rolled gravel, macadam or ballast</i> )	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal ( <i>asphalt concrete</i> )	22	2245
6	Beton ringan ( <i>light concrete</i> )	12,25-19,60	1250-2000
7	Beton	$F'c \leq 35 \text{ MPa}$	2320
		$35 < F'c \leq 150 \text{ MPa}$	$2240 + 2,29 F'c$
8	Baja ( <i>steel</i> )	78,5	7850
9	Kayu ( <i>wood</i> )	7,8	800
10	Kayu keras ( <i>hard wood</i> )	11,0	1125

Sumber: SNI 1725:2016

### 2.9.1.1. Berat Sendiri (MS)

Menurut SNI 1725:2016, berat sendiri adalah berat bagian dari elemen struktural lain yang dipikulnya termasuk berat material jembatan sebagai elemen struktural. Elemen nonstruktural jembatan juga dimasukkan dalam pembebanan ini. Tabel 2.4 menyajikan faktor pembebanan yang digunakan terhadap berat sendiri.

Tabel 2. 4 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Bahan	Faktor Beban ( $\gamma_{MS}$ )		
		Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{MS}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{MS}^U$ )	
			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

### 2.9.1.2. Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Selain itu, beban mati adalah berat total bahan yang membentuk beban pada jembatan, yang merupakan komponen nonstruktural dan dapat berubah seiring bertambahnya usia jembatan. Semua jembatan harus dirancang dengan cara yang memungkinkan beban aspal beton setebal 50 mm tambahan untuk pelapisan kembali di kemudian hari. Selain itu, pengaruh alat pelengkap dan sarana umum yang dipasang di jembatan harus dihitung dengan benar. Untuk mengidentifikasi kondisi paling berbahaya pada jembatan, berat pipa saluran air bersih, saluran air kotor, dan lainnya harus ditinjau baik dalam keadaan kosong maupun penuh. Tabel 2.5 menampilkan faktor pembebanan untuk beban mati tambahan/utilitas (MA).

Tabel 2. 5 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan atau Utilitas

Tipe Beban	Bahan	Faktor Beban ( $\gamma_{MA}$ )		
		Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{MA}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{MA}^U$ )	
			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

### 2.9.1.3. Beban Tetap Pelaksanaan

Beban tetap pelaksanaan adalah beban yang disebabkan oleh metode dan urutan pelaksanaan pekerjaan jembatan dan biasanya berhubungan dengan beban

aksi lainnya. Oleh karena itu, beban ini harus dikombinasikan untuk mengimbangi pengaruh beban yang terjadi. Tabel 2.6 menunjukkan faktor pembebanan beban pelaksanaan tetap.

Tabel 2. 6 Faktor Beban Akibat Pengaruh Pelaksanaan

Tipe Beban	Faktor Beban ( $\gamma_{PL}$ )		
	Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{PL}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{PL}^U$ )	
		Biasa	Terkurangi
Tetap	1,00	1,00	1,00

Sumber: SNI 1725:2016

### 2.9.2. Beban Lalu Lintas

Pada perencanaan jembatan, beban lalu lintas terdiri dari beban lajur "D" dan beban truk "T". Beban lajur "D" memengaruhi seluruh lebar jalur kendaraan dan berdampak pada jembatan yang sebanding dengan iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Beban truk "T" adalah kendaraan berat dengan tiga gandar yang ditempatkan di berbagai posisi di lajur lalu lintas. Per lajur lalu lintas rencana hanya diterapkan satu truk "T".

Dalam perhitungan jembatan dengan bentang sedang sampai panjang, beban "D" biasanya menjadi beban penentu; sebaliknya, beban "T" digunakan untuk rantai kendaraan dan jembatan dengan bentang pendek. Beban "D" yang nilainya telah dinaikkan atau diturunkan dapat digunakan kembali dalam situasi tertentu.

#### 2.9.2.1. Beban Lajur "D" (TD)

Beban lajur "D" terdiri dari beban terbagi rata (BTR) dan beban garis (BGT). Untuk mengetahui nilai intensitas beban pada lajur "D", BTR dibagi menjadi dua, yaitu BTR dengan intensitas  $q$  kPa dengan besaran  $q$  tergantung pada panjang total yang dibebani  $L$ , yaitu sebagai berikut:

$$\text{jika } L \leq 30 \text{ m: } q = 9,0 \text{ kPa} \dots \dots \dots (2.5)$$

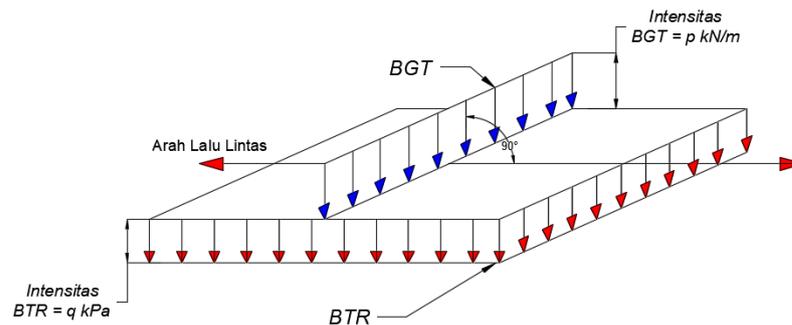
$$\text{jika } L > 30 \text{ m: } q = 9,0 \left( 0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

$q$  : adalah intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan (kPa)

$L$  : adalah panjang total jembatan yang dibebani (m)

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas  $p$  49,0 kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap lalu lintas di jembatan. Untuk mendapatkan momen lentur negatif yang paling besar pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi yang berbeda dari arah melintang jembatan. Gambar 2.10 menunjukkan beban "D".



Gambar 2. 10 Ilustrasi Beban Lajur "D"  
(sumber: Penulis)

Pada gelagar jembatan, momen geser dalam arah longitudinal diperoleh melalui distribusi beban dalam arah melintang. Tabel 2.7 menunjukkan faktor beban yang digunakan untuk beban lajur "D", yang tersebar pada seluruh lebar balok (tidak termasuk parapet, kerb, dan trotoar) dengan intensitas 100 % untuk panjang bentang terbebani.

Tabel 2. 7 Faktor Beban untuk Lajur "D"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban ( $\gamma_{TD}$ )	
		Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{TD}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{TD}^U$ )
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: SNI 1725:2016

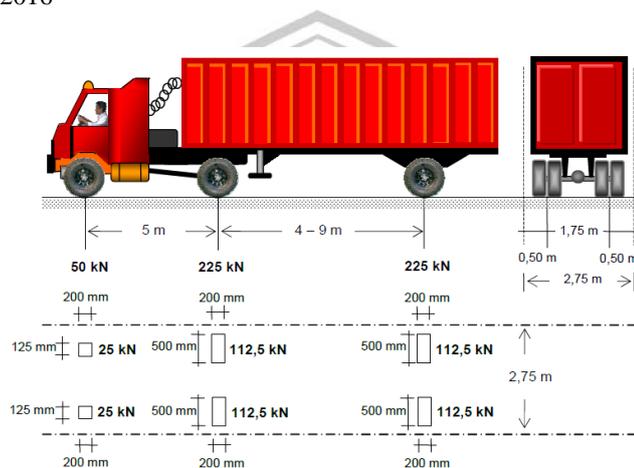
### 2.9.2.2. Beban Truk "T" (TT)

Faktor beban untuk beban truk "T" adalah beban lalu lintas yang bekerja pada struktur lantai. Menurut peraturan SNI 1725:2016, beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban "D" dan hanya dapat digunakan untuk perencanaan pelat lantai. Tabel berikut menunjukkan faktor beban untuk beban truk "T".

Tabel 2. 8 Faktor Beban untuk Beban "T"

Faktor beban untuk beban lajur "T"			
Faktor Beban ( $\gamma_{TT}$ )			
Tipe Beban	Jembatan	Keadaan batas layanan ( $\gamma_{TT}^S$ )	Keadaan batas ultimit ( $\gamma_{TT}^U$ )
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: SNI 1725:2016

Gambar 2. 11 Pembebanan Truk "T" (500kN)  
(Sumber: SNI 1725:2016)

Dalam arah melintang, pembebanan truk "T" dapat ditempatkan pada satu jalur lalu lintas yang direncanakan. Struktur lantai terdiri dari truk semi-trailer dengan susunan dan berat gandar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 . Berat tiap gandar disebarkan menjadi dua beban yang sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dan lantai, dengan jarak antar gandar dapat diubah dari 4 m hingga 9 m. Tekanan ban harus didistribusikan secara merata pada permukaan bidang kontak ketika ban mobil menyentuh struktur pelat lantai. Ban ini dianggap persegi panjang dengan panjang 750 mm dan lebar 250 mm.

### 2.9.2.3. Faktor Beban Dinamis (FBD)

Faktor beban dinamis (FBD) adalah konsekuensi dari interaksi antara kendaraan yang bergerak di atas jembatan. FBD sebagian besar bergantung pada frekuensi dasar suspensi kendaraan, yang biasanya berkisar antara 2 Hz dan 5 Hz untuk kendaraan berat, serta frekuensi getaran lentur jembatan. FBD untuk perencanaan dapat diwakili sebagai beban statis ekuivalen. Untuk pembebanan lajur

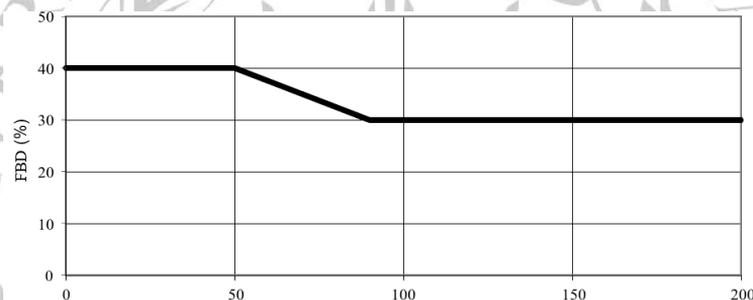
"D", FBD adalah fungsi panjang bentang ekuivalen, dan untuk pembebanan truk "T", besarnya BGT harus cukup untuk memberikan interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan dikali FBD. Panjang bentang sebenarnya sama dengan panjang bentang akuivalen untuk bentang tunggal. Rumus berikut memberikan panjang bentang ekuivalen  $L_E$  untuk bentang menerus:

$$L_E = \sqrt{L_{av}L_{max}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

$L_{av}$  : adalah panjang bentang rata-rata dari kelompok bentang yang disambungkan secara menerus

$L_{max}$  : adalah panjang bentang maksimum dalam kelompok bentang yang disambungkan secara menerus



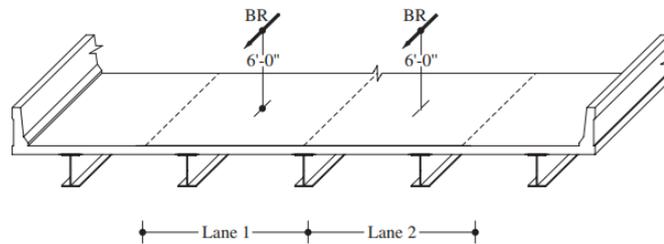
Gambar 2. 12 Faktor Beban Dinamis untuk Beban Lajur "D"  
(Sumber: SNI 1725:2016)

Nilai FBD yang dihitung digunakan untuk seluruh bagian bangunan di atas tanah, tetapi untuk pembebanan truk "T" secara teoritis dapat mencapai 30%.

#### 2.9.2.4. Gaya Rem (TB)

Semua lajur rencana yang dimuati harus ditempatkan dengan gaya rem yang sesuai dengan lalu lintas dengan arah yang sama. Gaya ini harus bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan harus dipilih yang paling tepat. Saat menghitung besarnya gaya rem untuk jembatan yang akan datang yang akan diubah menjadi satu arah, semua jalur rencana harus dibebani secara bersamaan. Tidak boleh ada gaya rem yang bekerja bersamaan dengan beban dinamis. Gaya rem yang paling besar harus diambil dari:

- 25 % dari berat gandar truk desain atau,
- 5 % dari berat trus rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR



Gambar 2. 13 Beban Rem yang terjadi pada Struktur Lantai Kendaraan  
(sumber: Gonggang, 2013)

### 2.9.2.5. Gaya Sentrifugal (TR)

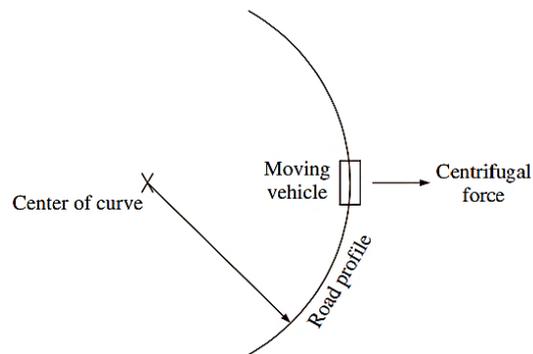
Pengaruh gaya sentrifugal pada beban hidup dapat dihitung dengan mengalikan berat gandar truk rencana dengan faktor C berikut untuk menghitung gaya radial atau efek guling dari beban roda:

$$C = f \frac{V^2}{gR_l} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

- $V$  : adalah kecepatan rencana jalan raya (m/detik)  
 $f$  : adalah faktor dengan nilai 4/3 untuk kombinasi beban selain keadaan batas fatik 1,0 untuk keadaan batas fatik  
 $g$  : adalah percepatan gravitasi 9,8 (m/detik<sup>2</sup>)  
 $R_l$  : adalah jari-jari kelengkungan lajur lalu lintas (m)

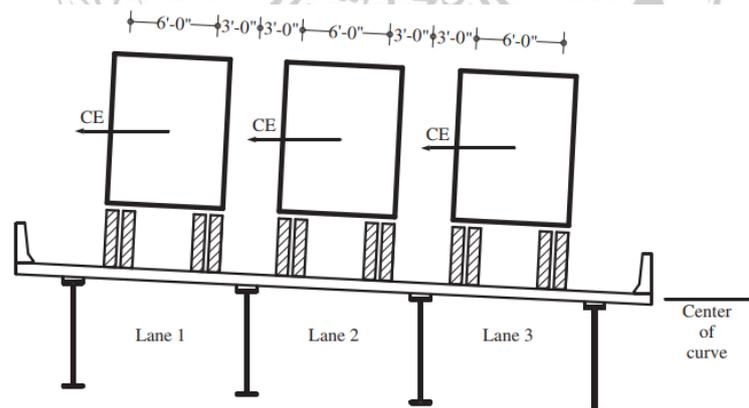
Gaya sentrifugal harus diterapkan secara horisontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan. Dalam hal ini, perencana harus menyediakan mekanisme untuk mengarahkan gaya sentrifugal dari permukaan jembatan ke struktur di bawah jembatan. Dalam perencanaan, efek superelevasi, yang mengurangi momen guling akibat gaya sentrifugal akibat beban roda, dapat dipertimbangkan.



Gambar 2. 14 *Generation Sentrifugal Force*  
(sumber: Gongkang, 2013)

### 2.9.2.6. Beban Pejalan Kaki (TP)

Komponen trotoar yang lebih besar dari 600 mm harus dirancang untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja bersamaan dengan beban kendaraan pada masing-masing lajur kendaraan. Jika trotoar dapat dinaiki, beban pejalan kaki tidak perlu dianggap bekerja bersamaan dengan kendaraan. Untuk perencanaan bagian jembatan lainnya, beban hidup kendaraan harus diterapkan pada jarak 250 mm dari tepi parapet jika trotoar direncanakan untuk berfungsi sebagai lajur kendaraan di masa depan. Faktor beban dinamis dalam hal ini tidak perlu dipertimbangkan.



Gambar 2. 15 Gaya Sentrifugal dari Kendaraan pada Jembatan akibat Superelevasi  
(sumber: Gongkang, 2013)

### 2.9.2.7. Beban Akibat Tumbukan Kendaraan (TC)

Memberikan keamanan kepada pengguna jalan adalah fungsi utama dari railing. Setiap sistem pengaman lalu lintas, railing, dan railing kombinasi secara struktur dan geometrik harus tahan terhadap benturan. Mekanisme beban railing jembatan dipilih berdasarkan kinerja jembatan, seperti:

- a. Kinerja 1 : Digunakan pada jalan dengan kecepatan rencana rendah dan volume kendaraan yang sangat rendah, jalan lokal dengan kecepatan rencana rendah.
- b. Kinerja 2 : Digunakan pada jalan lokal dan kolektor dengan kondisi baik seperti jumlah kendaraan berat yang sedikit dan rambu kecepatan sedikit.
- c. Kinerja 3 : Digunakan pada jalan arteri dengan kecepatan rencana tinggi dengan campuran kendaraan berat yang sangat rendah dan kondisi jalan yang baik.
- d. Kinerja 4 : Digunakan pada jalan arteri dengan kecepatan rencana tinggi, jalan bebas hambatan, jalan ekspres, dan jalan antar kota dengan campuran truk dan kendaraan berat.
- e. Kinerja 5 : Digunakan sesuai dengan kriteria 4 dan jika kendaraan berat memiliki porsi besar terhadap lalu lintas harian atau saat kondisi jalan mengharuskan kriteria kinerja railing yang tinggi.
- f. Kinerja 6 : Digunakan pada jalan yang dapat dilalui truk tipe tanker atau kendaraan dengan beban gravitasi yang cukup besar.

Berikut ini beban rencana yang akibat tumbukan kendaraan pada railing jembatan disajikan pada tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Kriteria Kinerja *Railling* terhadap Tumbukan

Karakteristik Kendaraan	Mobil		Truk Pickup	Satu Unit Truk Van	Truk Trailer Tipe Van	Truk Trailer Tipe Traktor-Tanker	
W (N)	7000	8000	20000	80000	220000	355000	355000
B (mm)	1700	1700	2000	2300	2450	2450	2450
G (mm)	550	550	700	1250	1630	1850	2050
Sudut tumbuk ( $\theta$ )	20	20	25	15	15	15	15
Kriteria kinerja	Kecepatan (km/jam)						
KK-1	50	50	50	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-2	70	70	70	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-3	100	100	100	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-4	100	100	100	80	N/A	N/A	N/A
KK-5	100	100	100	N/A	N/A	80	N/A
KK-6	100	100	100	N/A	N/A	N/A	80

Sumber: SNI 1725:2016

### 2.9.3. Beban Aksi Lingkungan

Pengaruh suhu, angin, banjir, gempa, dan faktor alam lainnya merupakan beban aksi lingkungan. Standar SNI 1725:2016 menetapkan beban rencana secara keseluruhan berdasarkan analisis statistik dari kejadian umum yang tercatat, tanpa memperhitungkan faktor khusus yang dapat meningkatkan dampak lokal.

#### 2.9.3.1. Beban Angin

Tekanan angin jembatan harus direncanakan dengan kecepatan angin dasar ( $V_B$ ) 90–126 km/jam. Beban angin harus didistribusikan merata pada permukaan yang terekspos angin. Luas area yang diperhitungkan adalah luas area dari semua komponen, termasuk sistem lantai dan railing, yang diposisikan tegak lurus terhadap angin. Namun, luasan yang tidak bermanfaat dapat diabaikan dalam perencanaan. Kecepatan angin rencana ( $V_{DZ}$ ) untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih dari 10.000 mm di atas permukaan tanah atau air harus dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{DZ} = 2,5 V_0 \left( \frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left( \frac{Z}{Z_0} \right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan:

$V_{DZ}$  : adalah kecepatan angin rencana pada elevasi rencana, Z (km/jam)

$V_{10}$  : adalah kecepatan angin pada elevasi 10000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana (km/jam)

- $V_B$  : adalah kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm.
- $Z$  : adalah elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari permukaan air dimana beban angin dihitung ( $Z > 10000$  mm)
- $V_o$  : adalah kecepatan gesekan angin, yang merupakan karakteristik meteorologi, sebagaimana ditentukan pada tabel 2.13, untuk berbagai macam tipe permukaan di hulu jembatan (km/jam)
- $Z_o$  : adalah panjang gesekan di hulu jembatan, yang merupakan karakteristik meteorologi.

$V_{10}$  dapat diperoleh dari :

- Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang
- Survey angin pada lokasi jembatan
- Jika tidak ada data yang lebih baik, perencana dapat mengasumsikan  $V_{10} = V_B = 90$  s/d 126 km/jam.

Tabel 2. 10 Nilai  $V_o$  dan  $Z_o$

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

Sumber: SNI 1725:2016

Berikut ini tekanan angin rencana (MPa) dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_D = P_B \left( \frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

$P_B$  : adalah tekanan angin dasar seperti pada tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Tekanan Angin Dasar

Komponen Bangunan Atas	Angin Tekan (MPa)	Angin Hisap (MPa)
Rangka, Kolom, dan Pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan Datar	0,0019	N/A

Sumber: SNI 1725:2016

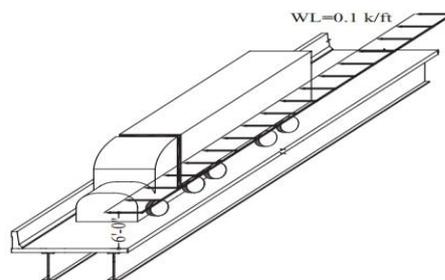
Gaya beban angin total tidak boleh kurang dari 4,4 kN/mm pada bidang tekan dan 2,2 kN/mm pada bidang hisap pada struktur rangka dan pelengkung. Pada balok atau gelagar, gaya ini juga tidak boleh kurang dari 4,4 kN/mm. Dengan

tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus, dan 1800 mm di atas permukaan jalan, beban angin pada struktur kendaraan juga harus diperhitungkan sebagai gaya yang akan mempengaruhi struktur jembatan. Tabel 2.12 menunjukkan beban sudut serang kendaraan.

Tabel 2. 12 Komponen Beban Angin yang Bekerja pada Roda Kendaraan

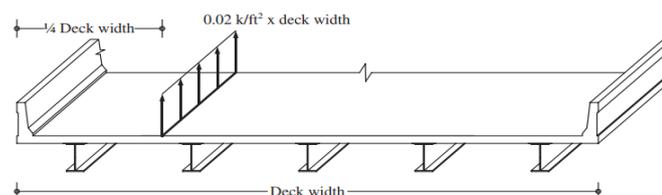
Sudut Derajat	Komponen Tegak Lurus N/mm	Komponen Sejajar N/mm
0	1,46	0,00
15	1,26	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

Sumber: SNI 1725:2016

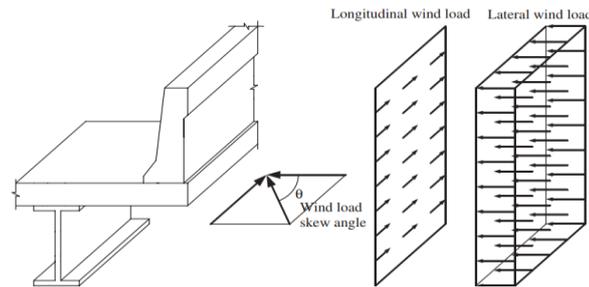


Gambar 2. 16 Ilustrasi Beban Angin pada Kendaraan (sumber: Gonggang, 2013)

Jembatan dianggap rentan terhadap efek aeroelastik angin jika rasio panjangnya terhadap lebarnya lebih besar dari tiga puluh. Oleh karena itu, jembatan harus memiliki kapasitas untuk memikul beban gaya angin vertikal ke atas sebesar  $9,6 \times 10^{-4}$  MPa dikalikan dengan lebar jembatan, termasuk parapet dan trotoar. Namun, analisis gaya ini hanya akan dilakukan dalam situasi Batas Kuat III dan Layan IV yang tidak melibatkan angin pada kendaraan dan dalam kasus pembebanan di mana arah angin dianggap tegak lurus terhadap sumbu memanjang jembatan



Gambar 2. 17 Pengaplikasian Tekanan Angin Vertikal (sumber: Gonggang, 2013)



Gambar 2. 18 Beban Angin pada Struktur Atas (Longitudinal dan Lateral)  
(sumber: Gongkang, 2013)

#### 2.9.4. Beban Aksi Lainnya

Beban aksi lainnya adalah beban yang sifatnya sementara atau temporer, seperti beban pelaksanaan selama proses konstruksi jembatan sesuai dengan metode kerja yang ditetapkan dan disetujui oleh pihak berwenang yang didasarkan pada keamanan konstruksi jembatan.

##### 2.9.4.1. Beban Pelaksanaan

Perencana harus menentukan tingkat kemungkinan kejadian dan menggunakan faktor beban sesuai untuk aksi lingkungan yang relevan. Kejadian harus diamati secara bersamaan selama pelaksanaan. Namun, dampak gempa tidak perlu dipertimbangkan selama proses konstruksi.

Beban pelaksanaan terbagi menjadi dua ialah :

- a. Beban yang disebabkan oleh aktivitas pelaksanaan itu sendiri dan;
- b. Aksi lingkungan yang mungkin timbul selama waktu pelaksanaan

#### 2.9.5. Beban Kombinasi

Tabel 2.13 menunjukkan kombinasi pembebanan dan penjelasan penggunaan batas. Faktor-faktor ini harus dipertimbangkan untuk mendapatkan hasil aksi jembatan yang paling berpengaruh dan disesuaikan dengan kebutuhan jembatan itu sendiri.

Tabel 2. 13 Faktor Kombinasi Pembebanan pada Jembatan

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	Digunakan 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	1,4 0	-	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	0,4 0	1,00	1,00	0,50/ 1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Ekstrem I	$\gamma_p$	$\gamma_{EQ}$	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,0 0	-	-
Ekstrem II	$\gamma_p$	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,0 0	1,0 0
Daya Layan I	1,0 0	1,00	1,00	0,3 0	1,00	1,00	1,00/ 1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Daya Layan II	1,0 0	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/ 1,20	-	-	-	-	-
Daya Layan III	1,0 0	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/ 1,20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{ES}$	-	-	-
Daya Layan IV	1,0 0	-	1,00	0,7 0	-	1,00	1,00/ 1,20	-	1,0 0	-	-	-
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

## 2.10. Perencanaan Struktur Atas Jembatan Pelengkung

Pada dasarnya struktur atas jembatan dibagi menjadi dua bagian yaitu struktur sekunder dan primer. Bagian-bagian pada elemen perencanaan dijelaskan pada subbab di bawah ini.

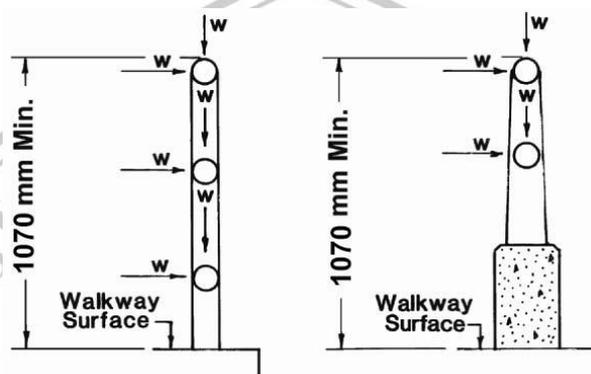
### 2.10.1. Perencanaan Struktur Sekunder Jembatan

Struktur sekunder pada jembatan yaitu komponen non utama atau struktur pendukung pada jembatan yang meliputi railing, tiang sandaran, dinding parapet, kerb dan trotoar.

### 2.10.1.1. Perencanaan Railing dan Tiang Sandaran

Dalam peraturan AASHTO 2017, perencanaan tiang sandaran dan railing harus mempertimbangkan beban vertikal dan horisontal masing-masing sebesar 0,75 kN/m.

Pembebanan pada railing dan tiang sandaran mencakup beban hidup akibat tumbukan, serta beban sendiri profil penampang railing dan tiang sandaran, yang dijelaskan dalam subbab dibawah.



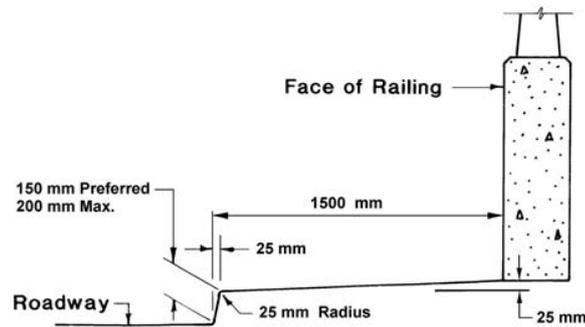
Gambar 2. 19 Proses Pembebanan pada Railing dan Tiang Sandaran  
(sumber: AASHTO 2017)

### 2.10.1.2. Perencanaan Dinding Parapet

Beban hidup parapet dapat mencapai 75 kN/m di atas jembatan. Perencanaan trotoar jembatan menurut ASSHTO 2017 digambarkan pada gambar 2.24. Persyaratan utama untuk jalan utama adalah tidak boleh lebih dari 300 mm tinggi dan 200 mm lebar untuk memfasilitasi akses pejalan kaki.

### 2.10.1.3. Perencanaan Kerb dan Trotoar

Beban hidup kerb 15 kN/m di atas jembatan dapat diperhitungkan. Berdasarkan persyaratan ASSHTO 2017, tebal pelat trotoar terhadap jalan utama tidak boleh lebih dari 200 mm dan lebarnya 150 mm untuk memudahkan pejalan kaki. Lebar minimum trotoar adalah 1000 mm. Gambar berikut menunjukkan perencanaan trotoar jembatan menurut ASSHTO 2017.



Gambar 2. 20 Ilustrasi Trotoar dan Kerb serta parapet Tipikal Jembatan (sumber:AASHTO 2017)

**2.10.2. Perencanaan Struktur Primer Jembatan**

Struktur Primer Jembatan terdiri dari komponen utama atau struktur penyusun utama jembatan. Komponen-komponen ini termasuk pelat lantai kendaraan, gelagar memanjang dan melintang, rangka pelengkung utama, batang penggantung, ikatan angin, dan tumpuan atau elastomere, seperti yang disebutkan di bawah ini.

**2.10.2.1. Perencanaan Pelat Lantai Kendaraan**

Lantai kendaraan berfungsi sebagai penyalur beban dari roda mobil yang kemudian diteruskan ke gelagar jembatan. Selain itu, pelat lantai kendaraan berfungsi sebagai pengaku elemen gelagar melintang dan memanjang jembatan. Sistem beton bertulang digunakan untuk merencanakan pelat lantai kendaraan. Oleh karena itu, standar SNI 2847:2013 dan RSNI T-12-2004 digunakan untuk perencanaan pelat lantai kendaraan.

a. Menentukan Tebal Pelat Lantai Kendaraan

Berdasar RSNI T-12-2004, maka tebal minimum pelat lantai kendaraan ( $t_s$ ) adalah sebagai berikut:

$$t_s \geq 200 \text{ mm} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$t_s \geq (100 + 40L) \text{ mm} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

$L$  : adalah bentang pelat diukur dari as ke as tumpuan (m)

b. Kontrol Tulangan Lentur

Penulangan pelat lantai kendaraan mengacu pada peraturan/code SNI:2847:2013 dengan persyaratan umum sebagai berikut:

- Rasio tulangan

$$\rho_b = \frac{0,85 f'_c \beta_1}{f_y} \cdot \frac{600}{(600+f_y)} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\rho_{max} = 0,75 \rho_b \dots\dots\dots (2.16)$$

Catatan: nilai  $\beta$  tergantung dari mutu beton yang digunakan.berdasar SNI 2847:2013, penentuan nilai  $\beta$  pada perhitungan sebagai berikut:

untuk  $f'_c$  antara 17-28 MPa , nilai  $\beta$  adalah 0,85

untuk  $f'_c$  diatas 28 MPa, maka

$$\beta = 0,85 - \frac{(f'_c - 30)}{7} \times 0,05 \geq 0,65 \dots\dots\dots (2.17)$$

- Menentukan tulangan lentur pelat

$$M_u \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\rho_{pakai} = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.21)$$

$$A_{sperlu} = \rho \times b \times d \dots\dots\dots (2.22)$$

$$s = \frac{1000 \times A_b}{A_s} \text{ (jarak antar tulangan)} \dots\dots\dots (2.23)$$

- Kontrol kapasitas pelat lantai terhadap lentur

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c \times b} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$d = h - \text{selimut beton} - 0,5 \text{ diameter tulangan} \dots\dots\dots (2.26)$$

- Menentukan tulangan susut pelat

$$0,0018 \times b \times d \dots\dots\dots (2.27)$$

Koefisien ini mengacu pada SNI 2847-2013 tentang slab yang menggunakan batang tulangan ulir dengan mutu 240 MPa.

c. Kontrol Geser Pons (Akibat Roda Kendaraan)

Beban roda pada kendaraan menyebabkan adanya beban yang terkonsentrasi pada pelat lantai kendaraan sehingga menyebabkan lantai kendaraan harus mampu menahan gaya geser pons dari roda kendaraan. Adapun bidang kontak kendaraan berdasar SNI 1725:2016 yaitu terdiri atas satu atau dua roda yang diasumsikan membunyai bentuk persegi panjang dengan panjang 750 mm dan lebar 250 mm. Dimana tekanan ban harus diasumsikan terdistribusi merata pada permukaan bidang kontak. Secara teoritis, kemiringan runtuh geser yang diakibatkan oleh beban terkonsentrasi yaitu 45° dari sisi terluar beban. Berikut ini kapasitas geser dari pelat beton bertulang tanpa tulangan geser.

$$V_u \leq \phi V_c \dots\dots\dots (2.28)$$

Digunakan nilai terkecil dari:

$$\phi V_{c1} = \phi 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_o}\right) \lambda \sqrt{f'_c} b_o d \dots\dots\dots (2.29)$$

$$\phi V_{c2} = \phi 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b_o d \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana:

$V_c$  : kapasitas geser nominal pelat beton tanpa tulangan geser (N, Kn)

$\phi$  : faktor reduksi geser pons, digunakan 0,75

$\beta_o$  : rasio sisi panjang terhadap sisi pendek dari bidang kontak roda kendaraan

$\lambda$  : faktor mutu beton, nilai 1 digunakan lebih konservatif

$f'_c$  : mutu beton rencana (MPa)

$b_o$  : keliling dari penampang kritis pada pelat lantai kendaraan (mm)

$d$  : tinggi efektif pelat (mm)

### 2.10.2.2. Perencanaan Gelagar Melintang dan Memanjang

Gelagar merupakan balok yang menopang beban dari lantai kendaraan serta beban kendaraan yang melewati jembatan sehingga didapatkan hasil yang stabil untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada bangunan jembatan tersebut.

- a. Beban yang dipikul gelagar melintang antara lain :
  - Beban permanen (beban sendiri pelat lantai kendaraan, beban aspal, beban sendiri gelagar melintang, reaksi dari gelagar memanjang dalam).
  - Beban lalu lintas ( beban lajur “D”, beban lajur “T”, faktor beban dinamis “FBD”).
- b. Beban yang dipikul gelagar memanjang antara lain :
  - Beban permanen (beban sendiri pelat lantai kendaraan, beban aspal, beban sendiri gelagar memanjang).
  - Beban lalu lintas ( beban lajur “D”, beban lajur “T”, faktor beban dinamis “FBD”).

### 2.10.2.3. Perencanaan Rangka Pelengkung Utama

Untuk menerima gaya dalam yang disalurkan dari kendaraan dan diteruskan ke tumpuan, jembatan harus memiliki bentuk geometrik yang sesuai dengan batasan optimal yang telah ditentukan. Menurut *Handbook of Bridge Engineering, Second Edition: Fundamental* 2014, beberapa persyaratan yang biasanya digunakan dalam perencanaan geometrik jembatan pelengkung adalah persamaan parabola.

Tabel 2. 14 Penjelasan Penggunaan Keadaan Batas

Keadaan Batas	Penjelasan
Kuat I	Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai
Kuat II	Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kendaraan khusus yang ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin
Kuat III	Kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenai beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam
Kuat IV	Kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar
Kuat V	Kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam

Ekstrem I	Kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup $\gamma_{EQ}$ yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasar kepentingan jembatan
Ekstrem II	Kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup berkurang dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat tumbukan kendaraan (TC). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasikan dengan beban akibat tumbukan kendaraan dan tumbukan kapal
Daya Layan I	Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhitungkan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
Daya Layan II	Kombinasi pembebanan yang ditujukan untuk mencegah terjadinya pelelehan pada struktur baja dan selip pada sambungan akibat beban kendaraan
Daya Layan III	Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada area memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental
Daya Layan IV	Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak
Fatik (TD dan TR)	Kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas

Sumber: SNI.1725:2016

#### 2.10.2.4. Perencanaan Batang Penggantung / Hanger

Batang penggantung adalah bagian dari struktur tegangan yang menggunakan jalur kabel, produk industri. Produk struktur tegangan macaloy dengan  $F_y = 550$  MPa dan  $F_u = 880$  MPa digunakan pada jembatan Trisula Lama, sehingga mutu struktur kabel sangat terjamin. Batang tarik dapat digunakan untuk mengontrol penampang. Beberapa karakteristik yang harus dimiliki oleh batang penggantung jembatan, juga dikenal sebagai hanger, adalah sebagai berikut:

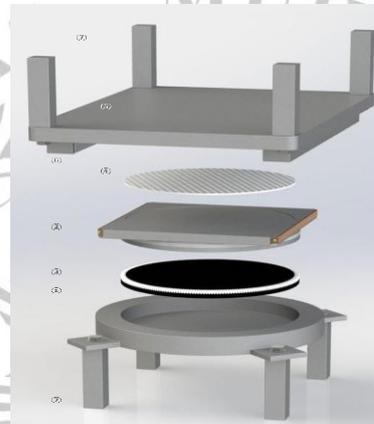
- Mempunyai penampang yang homogen pada seluruh bentang
- Tidak terjadi momen dan gaya desak (murni tarik)
- Pada jembatan batang tarik berperan sebagai penggantung lantai kendaraan dan berupa beban titik
- Struktur kabel harus mempertahankan bentuk geometrinya ketika diberi beban tarik.



Gambar 2. 21 *Hanger strut compression dan tension macaloy*  
(sumber: macaloy.com)

### 2.10.2.5. Perencanaan Tumpuan

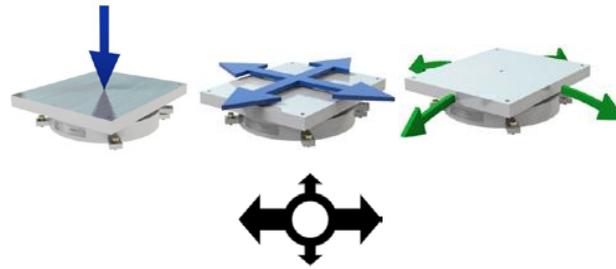
Pada umumnya, sendi-rol digunakan untuk perletakan jembatan. Namun, seiring perkembangan teknologi perletakan jembatan, beberapa jenis perletakan seperti bearing pad dikembangkan, yang tetap menjaga fungsi sendi-rol.



Gambar 2. 22 Bagian-Bagian Penting *Pot Bearing* (1) *Steel Pot*, (2) *Piston*, (3) *Elastometric Pad*, (4) *PTFE Sliding Material*, (5) *Sliding Plate*, (6) *Guide Bars*, (7) *Dowels* Atau *Threaded Sleeves* (Opsional)  
(sumber: mageba reston pot bearing)

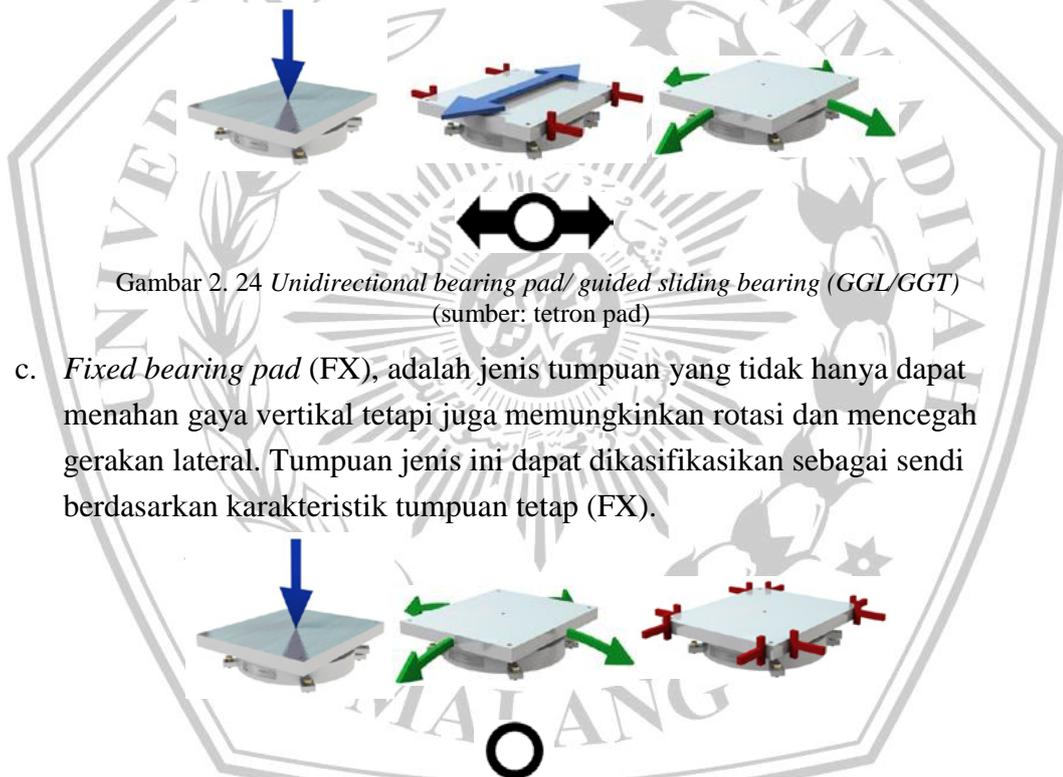
Jenis pot bearing yang digunakan pada jembatan berdasarkan kemampuan tumpuan untuk memikul pergerakan beban yang bekerja adalah sebagai berikut (*sumber : Tetron CD Pot*).

- a. *Multidirectional bearing pad (GL)*, adalah jenis tumpuan yang dapat menahan gaya vertikal, memungkinkan rotasi, dan memiliki dua gerakan arah lateral (x dan y). Berdasarkan karakteristik *multidirectional bearing pad (GL)*, tumpuan jenis ini disebut sebagai tumpuan rol.



Gambar 2. 23 *Multidirectional Bearing Pad/Free Sliding Bearing (GL)*  
(sumber: tetron pad)

- b. *Unidirectional bearing pad (GGL)*, adalah enis tumpuan yang dapat menahan gaya vertikal, memungkinkan rotasi, dan memiliki 1 gerakan arah lateral (x atau y). Karakteristik multidirectional bearing pad (GGL) mendefinisikan tumpuan jenis ini sebagai tumpuan rol.



Gambar 2. 24 *Unidirectional bearing pad/ guided sliding bearing (GGL/GGT)*  
(sumber: tetron pad)

- c. *Fixed bearing pad (FX)*, adalah jenis tumpuan yang tidak hanya dapat menahan gaya vertikal tetapi juga memungkinkan rotasi dan mencegah gerakan lateral. Tumpuan jenis ini dapat dikasifikasikan sebagai sendi berdasarkan karakteristik tumpuan tetap (FX).



Gambar 2. 25 *Fixed bearing pad (FX)*  
(sumber: tetron pad)

Tujuan penempatan atau tumpuan pada jembatan adalah untuk memindahkan beban aksi yang terjadi pada struktur utama ke struktur bawah jembatan, juga dikenal sebagai pondasi. Pot bearing, atau pelat baja sirkular, adalah jenis perletakan yang paling umum digunakan pada jembatan. Ini terdiri dari piston baja yang tertumpu pada cakram elastometer yang terkurung di dalam pot atau

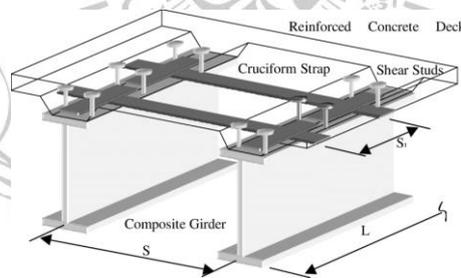
silinder baja. Dengan teknologi tumpuan ini, tumpuan jembatan dapat menahan beban vertikal, perpindahan horisontal, dan translasi dan rotasi. Gambar 2.26 menunjukkan komponen pot bearing penting.

Adapun beberapa alasan memilih tumpuan *pot bearing* pada jembatan pelengkung *Through Arch* adalah sebagai berikut:

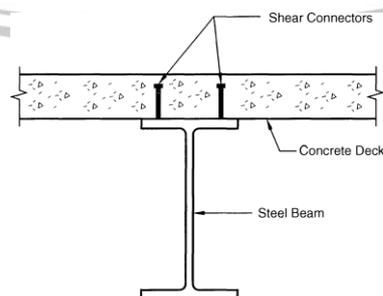
- Tahan terhadap gaya horisontal yang besar dan mampu mendistribusikan dengan aman (dengan batas perpindahan tertentu)
- Daya tahan yang tinggi terhadap beban berulang/dinamis serta sikus fatik
- Mampu mengakomodasi rotasi dengan batasan tertentu
- Kapasitas gaya vertikal yang besar, tersedia 50 sampai 10.000 ton.

### 2.11. Balok Lentur Komposit

Balok lentur komposit terdiri dari dua jenis material: beton dan baja. Balok jembatan menjadi lebih kaku dan berfungsi sebagai bracing karena pelat beton monolit yang dipasang pada sumbu jembatan yang kuat. Elemen beton pada balok akan memikul gaya tekan, sedangkan baja itu sendiri akan memikul gaya tarik pada serat bawah. Struktur ini dikenal sebagai balok komposit.



Gambar 2. 26 Ilustrasi Balok Komposit  
(sumber: engineer.com)



Gambar 2. 27 Potongan Balok Komposit  
(sumber: Barker, 2017)

### 2.11.1. Lebar Efektif Balok

Untuk menentukan daerah yang paling efektif memikul tegangan tekan yang bekerja akibat beban, perlu diketahui lebar efektif balok tersedia, yang dapat dihitung dengan mengetahui bentang pelat (atau jarak antar balok ( $b$ ) dan bentang balok ( $L$ ). Lebar efektif penampang komposit adalah sebagai berikut (AISC-360-16):

- a.  $0,25 L$ , dihitung dari jarak as ke as tumpuan balok
- b.  $0,5b$ , dihitung dari as balok ke tepi luar pelat beton
- c.  $b$ , merupakan jarak as ke as balok balok pendukung pelat

### 2.11.2. Kapasitas Lentur Penampang Komposit

Perhitungan kapasitas momen plastis penampang komposit harus dilakukan sebelum menghitung distribusi tegangan plastis yang mungkin. Ini memerlukan pencarian garis netral plastis. Dalam perencanaan balok komposit jembatan, diharapkan plastis netral berada di dalam plat beton. Pelat beton akan mengakomodir gaya tekan (C), sedangkan profil baja akan mengakomodir gaya tarik (T). Ketentuan dan prosedur untuk menghitung kapasitas penampang komposit adalah sebagai berikut:

1. Penentuan lebar efektif penampang

Penentuan lebar efektif penampang mengacu pada sub bab 2.22.1

2. Menentukan resultan gaya kopel maksimum

- a. Resultan gaya tekan maksimum

$$C = 0,85 f'_c A_c \text{ (Compress)} \dots\dots\dots (2.56)$$

- b. Resultan gaya tarik maksimum

$$T = F_y A_s \text{ (Tension)} \dots\dots\dots (2.57)$$

3. Menentukan tinggi blok tegangan tekan (*compress stress blok*) pada pelat beton

$$a = \frac{f_y A_s}{0,85 f'_c A_b} \dots\dots\dots (2.58)$$

Asumsi resultan gaya kopel benar terhadap tinggi blok tegangan, dimana  $a < t_c$  (sehingga sumbu netral berada pada pelat beton).

4. Menentukan kapasitas momen plastis dari penampang

$$Y_c = t \text{ (pelat beton solid)}$$

$$Y_c = h_r + t_c \text{ (pelat komposit dengan dek baja)}$$

$$Y_2 = Y_c - 1/2 a$$

Sehingga,

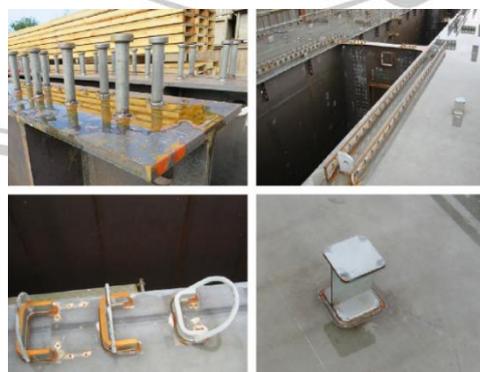
$$M_n = M_p = F_y A_s (Y_2 + 1/2 d) \dots\dots\dots (2.59)$$

### 2.11.3. Kapasitas Geser Penampang Komposit

Kapasitas geser penampang komposit tidak dipengaruhi oleh pelat beton, karena kekuatan geser balok ditolak oleh web atau badan profil balok. Ini berarti kapasitas geser penampang komposit tidak berbeda dengan penampang non-komposit atau batang geser biasa. Oleh karena itu, kapasitas geser penampang komposit dan non komposit dinilai sama untuk perencanaan.

### 2.11.4. *Shear Connector*

Untuk memastikan bahwa tidak ada pergeseran antara pelat beton dan plat lantai kendaraan, shear connector adalah komponen jembatan pada balok komposit. Selain itu, bagian shear connector berfungsi sebagai komponen yang menyatukan bagian beton dan profil baja menjadi komposit. Dalam perencanaan gelagar jembatan, berbagai jenis shear stud digunakan (Gambar 2.43). Namun, dalam beberapa situasi, jembatan biasanya menggunakan headed shear stud sebagai elemen pengikat. Diameter shear stud yang paling umum adalah 19 mm, 22 mm, dan 25 mm.



Gambar 2. 28 Tipe shear connector  
(sumber: Lin dan Tainguchi, 2017)

### 2.11.5. Ketentuan Umum *Shear Connector*

Berdasar RSNI T-03-2005, terdapat beberapa ketentuan umum perihal detail *shear stud* antara lain sebagai berikut:

1. Jarak memanjang antara penghubung tidak boleh lebih besar dari nilai yang ditetapkan sebagai berikut:
  - a. 600 mm
  - b. Dua kali tebal pelat lantai
  - c. Empat kali tinggi *shear connector*
2. Diameter *shear stud* yang dilas pada pelat sayap tidak boleh melebihi :
  - a. 1,5 kali tebal pelat sayap bila pelat sayap memikul tegangan tarik
  - b. 2,0 kali tebal pelat sayap bila tidak terdapat tegangan tarik
3. Kedalaman minimum dari *shear stud* dalam tiap arah adalah 75 mm. kedalaman *shear stud* sepanjang sayap sebaiknya tidak kurang dari tinggi *shear stud*.
4. Tebal bebas selimut beton diatas tepi *shear stud* tidak boleh kurang dari 50 mm. selimut beton bebas horisontal pada *shear stud* juga tidak boleh kurang dari 60 mm
5. Panjang *stud* dari pelat dasar minimum sampai ujungnya adalah  $L_{stud} > 4$  kali diameter *stud*

### 2.11.6. Kuat Geser Nominal *Shear Stud*

Kuat geser nominal dari *shear stud* (*steel headed stud*) tunggal (per satu buah), dapat diformulasikan sebagai  $Q_n$  yang terpasang pada sayap penampang balok komposit (beton solid). Dapat dihitung sesuai dengan code AISC 2010 (18-angkur baja).

$$Q_n = 0,5A_{sa}\sqrt{f_c E_c} \leq R_g R_p A_{sa} F_u \dots \dots \dots (2.60)$$

Dimana:

$A_{sa}$  : luas penampang dari *shear stud* (mm<sup>2</sup>)

$E_c$  : modulus elastis dari beton,  $4700\sqrt{f'_c}$ , untuk beton normal

$F_u$  : kuat tarik minimum shear stud (MPa)

Adapun beberapa parameter dari  $R_g$  dan  $R_p$  lebih jelasnya tertera pada tabel berikut ini:

Tabel 2. 15 Nilai  $R_g$  dan  $R_p$

Kondisi	$R_g$	$R_p$
Tanpa dek-baja	1,0	0,75
Memakai dek-baja yang rusuknya paralel dengan arah profil balok		
- $W_r/h_r > 1,5$	1,0	0,75
- $W_r/h_r < 1,5$	0,85	0,75
Memakai dek-baja yang rusuknya tegak lurus dengan profil balok. Jumlah <i>shear stud</i> pada setiap rusuknya.		
- 1 (satu)	1,0	0,6
- 2 (dua)	0,85	0,6
- 3 (tiga) atau lebih	0,70	0,6

Sumber: Dewobroto, 2016

Jumlah *shear stud* pada pelat sayap dapat dihitung dari gaya geser nominal yang terjadi pada pelat lantai kendaraan ( $V'$ ) dibagi dengan kuat geser nominal dari satu buah stud tunggal,  $Q_n$ .

$$n = \frac{V'}{Q_n} \dots \dots \dots (2.61)$$

Dimana:

$N$  = jumlah *shear stud* per baris

$Q_n$  = kuat geser nominal shear stud tunggal

$V'$  = Gaya geser nominal pada pelat komposit

$V'$  =  $C = 0,85f_c A_c$  (Resultan gaya tekan maksimum komposit)

$V'$  =  $T = F_y A_s$  (Resultan gaya tarik maksimum komposit)

## 2.12. Batang Tarik (Tension Member)

Secara umum, baja memiliki kapasitas yang baik untuk memikul gaya tarik dan tekan. Namun, secara teoritis, dapat menahan gaya tarik lebih baik daripada gaya tekan. Batang tarik umumnya dibagi menjadi dua kategori: kuat tarik nominal berdasar penampang bruto (gross section yielding) dan kuat tarik nominal berdasar fraktur penampang efektif (Net section fracture). Dalam perencanaan, nilai terkecil dari kuat tarik nominal berikut digunakan:

- a. Kuat tarik nominal kondisi leleh pada penampang bruto (*Gross section yielding*)

$$P_r = \phi_y P_{ny} = \phi_y F_y A_g \dots\dots\dots (2.31)$$

Dimana:

$F_y$  : adalah tegangan leleh baja (MPa)

$A_g$  : adalah luas penampang bruto pada batang/member ( $\text{mm}^2$ )

$\phi_y$  : faktor tahanan untuk kondisi leleh, dapat diambil sebesar 0,95

Ada konsentrasi tegangan yang bekerja pada batang beberapa kali lebih besar dari tegangan yang direncanakan, yang memungkinkan material daktail untuk mengatasi tegangan. Perilaku ini menyebabkan tegangan tidak merusak lubang, tetapi hanya menyebabkan deformasi saat tegangan leleh mencapai lubang. Ini adalah teori yang dianggap belum meleleh yang menyebabkan redistribusi gaya (tegangan) ke bagian lubang baut.

- b. Kuat tarik nominal kondisi leleh pada penampang efektif (*Net section fracture*)

$$P_r = \phi_u P_{nu} = \phi_u F_u A_n R_p U \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana:

$F_u$  : adalah tegangan tarik putus baja (MPa)

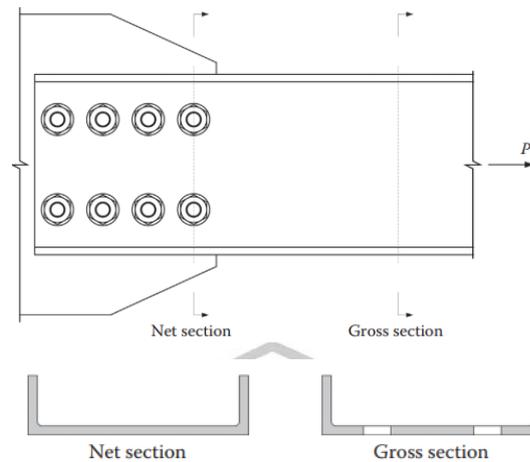
$A_n$  : adalah luas penampang bersih (*netto*) dikurangi lubang ( $\text{mm}^2$ )

$R_p$  : Faktor reduksi untuk lubang baut, dimana 0,9 pada kondisi ulir baut masuk area lubang baut dan 1,0 untuk kondisi ulir baut tidak masuk area lubang.

$U$  : Faktor *Shear Lag*

$\phi_u$  : Faktor tahanan untuk kondisi fraktur 0,80

Sifat mekanis baja, peningkatan tegangan, yang disebabkan oleh peningkatan tegangan yang terkonsentrasi di sekitar lubang, pasti akan dimanfaatkan oleh kekuatan tarik pada penampang berlubang (di area sambungan). Oleh karena itu, pola keruntuhan yang digunakan adalah  $F_u$ , dan faktor tahanan yang diperlukan tentunya berbeda.



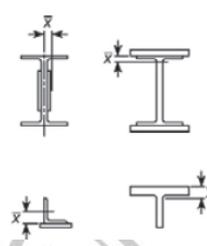
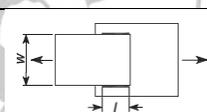
Gambar 2. 29 Ilustrasi Tinjauan Kapasitas Tarik pada Penampang Bruto (*Gross Section Yielding*) dan Netto (*Net Section Fracture*)

(sumber : Bridge Engineering Handbook Second Edition, 2014)

### 2.12.1. Faktor *Shear Lag*

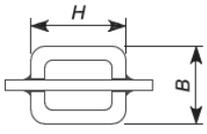
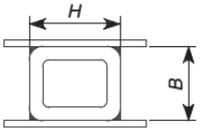
Pada batang tarik, faktor *shear lag* ( $U$ ) digunakan untuk mengantisipasi ketidaksempurnaan selama proses penyambungan, yang menyebabkan distribusi tegangan tidak merata dan konsentrasi tegangan terpusat di tempat-tempat tertentu. Hal ini pasti mengurangi kinerja batang tarik. Bentuk sambungan yang digunakan menentukan besar atau kecilnya *shear lag* batang tarik. Tidak diragukan lagi, pilihan sambungan bergantung pada seberapa mudah pembuatannya dan kemudahan pelaksanaannya. Jenis sambungan yang digunakan menentukan besarnya *shear lag* yang dimiliki batang tarik. Tentu saja, biaya produksi dan kemudahan pemasangan juga diperhitungkan saat memilih tautan. Faktor *shear lag* ( $U$ ) batang tarik adalah sebagai berikut (AASHTO 2017 dan SNI 1729:2020).

Tabel 2. 16 Faktor Shear-Lag (U) Batang Tarik

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor Shear lag (U)	Contoh
1	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik disalurkan secara langsung ke setiap dari elemen profil melintang melalui sarana penyambung atau las-las (kecuali seperti dalam Kasus 4,5 dan 6)	$U = 1,0$	_____
2	Semua komponen struktur tarik , kecuali pelat dan PSB, dimana beban tarik disalurkan ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang melalui sarana penyambung atau las longitudinal atau melalui las longitudinal dalam kombinasi , dengan las transversal. (secara alternatif, untuk W, M, S dan HP, Kasus 7	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$	
3	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik hanya disalurkan melalui las transversal ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang	$U = 1,0$ dan $A_n = \text{luas dari elemen yang disambung langsung}$	_____
4	Pelat dimana beban tarik disalurkan melalui hanya las longitudinal	$L \geq 2w \dots U = 1,0$ $2w > L \geq 1,5w \dots U = 0,87$ $1,5w > L > w \dots U = 0,75$	
5	PSB bundar dengan sebuah pelat buhul konsentrik tunggal.	$L \geq 1,3D \dots U = 1,0$ $D \leq L < 1,3D \dots U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	

Sumber: SNI 1729: 2020 dan AASHTO 2017

Tabel 2. 17 Faktor Shear-Lag (U) Batang Tarik (Lanjutan)

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor Shear lag (U)	Contoh
6	PSB Persegi	Dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal	$L \geq H \dots U = 1 - \frac{\bar{X}}{L}$ $\bar{X} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$ 
		Dengan dua sisi pelat buhul	$L \geq H \dots U = 1 - \frac{\bar{X}}{L}$ $\bar{X} = \frac{B^2}{4(B + H)}$ 
7	Bentuk W, M, S atau HP atau T memotong dari bentuk-bentuk ini (jika U dihitung dalam kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan)	Dengan sayap disambungkan dengan 3 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$b_f \geq \frac{2}{3}d \dots U = 0,90$ $b_f < \frac{2}{3}d \dots U = 0,85$ 
		Dengan badan disambungkan dengan 4 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$U = 0,70$
8	Siku tunggal dan ganda (jika U dihitung dalam kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	Dengan 4 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$U = 0,80$
		Dengan 3 sarana penyambung per baris di arah pembebanan (dengan lebih sedikit dari 3 sarana penyambung per baris di arah pembebanan, gunakan kasus 2).	$U = 0,60$

L = panjang sambungan (mm) ; w = lebar pelat (mm) ;  $\bar{X}$  = eksentrisitas sambungan (mm) ; B = lebar keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur 90° terhadap bidang sambungan (mm) ; H = tinggi keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur pada bidang sambungan (mm).

Sumber: SNI 1729: 2020 dan AASHTO 2017

### 2.12.2. Batasan Rasio Kelangsingan Batang Tarik

Batang dapat sangat kecil karena material baja yang sangat tinggi. Karena kelangsingan hanya berlaku untuk batang tekan yang mengalami tekuk, batasan rasio kelangsingan secara teoritis hanya berlaku untuk batang tekan. Menurut AASHTO 2017, rasio kelangsingan tetap disarankan karena struktur yang langsing cenderung bergetar dan bergoyang, dan jika terlalu banyak akan menyebabkan ketidaknyamanan selama proses service. Rasio kelangsingan memiliki batasan berikut:

- a. Untuk batang utama

$$\frac{L}{r} \leq 200 \dots\dots\dots (2.33)$$

- a. Untuk batang sekunder

$$\frac{L}{r} \leq 240 \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana :

$L$  : panjang batang (mm)

$r$  : jari-jari girasi penampang (mm)

Rasio batasan kelangsingan ini tidak dapat diterapkan pada hanger yang menggunakan material strand karena material strand dirancang hanya untuk menahan gaya tarik selama masa layan. Selain itu, penggunaan struktur gantung, yang juga dikenal sebagai hanger, secara teoritis akan meningkatkan kekakuannya sesuai dengan beban yang bekerja sambil mempertahankan struktur geometrinya. Oleh karena itu, rasio kelangsingan struktur kabel merupakan standar unik untuk produk yang dipilih.

### 2.13. Batang Tekan (Compression Member)

Batang tekan jembatan mengacu pada bagian struktur yang menerima beban tekan sentris tepat pada titik sentris batang atau titik berat penampang. Namun, tentunya sangat sulit pada tingkat presisi pemasangan sehingga menimbulkan eksentrisitas pada batang, yang tentunya menyebabkan momen pada batang. Namun, dengan persyaratan umum, eksentrisitas pada struktur batang relatif kecil dan dapat diabaikan, sehingga prosedur desain dapat digunakan. Sangat jelas bahwa penentuan kapasitas batang tekan berbeda dari batang tarik karena batang tekan

hanya menggunakan parameter material  $F_u$  dan  $F_y$ . Namun, karena  $F_u$  tidak pernah tercapai pada batang tekan, penentuan kapasitas batang tekan hanya menggunakan  $F_y$ . Selain faktor material, penentuan kapasitas batang tekan juga dipengaruhi oleh konfigurasi bentuk fisik (panjang batang) dan geometri potongan. Oleh karena itu, untuk mencegah tekuk baik lokal maupun global, batang tekan harus mempertimbangkan rasio kelangsingan batang. Untuk alasan ini, AASHTO 2017 menetapkan kategori untuk membedakan penampang langsing dan tidak langsing.

### 2.13.1. Batasan Rasio Kelangsingan Batang Tekan

Faktor penting dalam perencanaan adalah rasio kelangsingan batang, yang juga memengaruhi perilakunya. Dalam perencanaan, luar penampang, pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur ( $I_{min}$ ), dan panjang batang yang ditumpu yang diformulasikan dengan panjang efektif dengan kondisi tumpuan ( $KL$ ) adalah faktor penting. Menurut AASHTO 2017, batasan rasio kelangsingan batang tekan adalah sebagai berikut:

- a. Untuk batang utama

$$\frac{KL}{r} \leq 120 \quad \dots \dots \dots (2.35)$$

- b. Untuk batang sekunder

$$\frac{KL}{r} \leq 140 \quad \dots \dots \dots (2.36)$$

Dimana :

$K$  : faktor panjang efektif batang (Gambar 2.45)

$L$  : panjang batang (mm)

$r$  : jari-jari girasi penampang (mm)

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical <i>K</i> value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Design value of <i>K</i> when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.0	1.2	2.1	2.0
End condition code		Rotation fixed Rotation free	Translation fixed Translation fixed	Rotation fixed Translation free	Rotation free Translation free	Rotation free Translation free

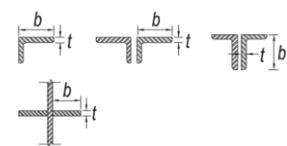
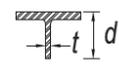
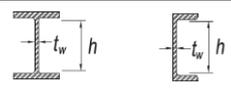
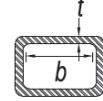
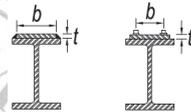
Gambar 2. 30 Faktor Panjang Efektif Batang Tekan (sumber: ASSHTO, 2017)

### 2.13.2. Klasifikasi Penampang Batang Tekan

Ada dua jenis perilaku tekuk yang terjadi pada batang tekan: tekuk lokal (*local buckling*) dan tekuk global (*global buckling*). Agar struktur yang direncanakan bekerja dengan baik, kedua perilaku ini harus dihindari. Jadi, menurut ASSHTO 2017 dan SNI 1729:2020, penampang batang diklasifikasikan menjadi kompak (*compact*), tidak kompak (*non-compact*), dan langsing (*slender*). Ini dicapai dengan menilai rasio lebar dan tebal (*b/t*) dengan nilai batasan rasio seperti yang ditunjukkan dalam tabel berikut (AASHTO 2017).

Tabel 2. 18 Rasio Tebal terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Menahan Gaya Aksial Murni

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio tebal terhadap lebar	Batasan rasio tebal terhadap lebar	Contoh
Elemen tanpa pengaku	1	Sayap dari profil I canai panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I canai panas; kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap dari kanal, dan sayap dari T.	$b/t \leq 0,56 \sqrt{E/F_y}$	
	2	Sayap dari profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	$b/t \leq 0,64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ <sup>(a)</sup>	

3	Kaki dari siku tunggal, kaki dari siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tak diperkaku tak-diperkaku lainnya	$b/t$	$0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Stem dari T	$b/t$	$0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
5	Badan dari profil I simetris ganda dan kanal	$b/t$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
6	Dinding PSB persegi dan boks dari ketebalan merata	$b/t$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
7	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara deretan sarana penyambung atau las	$b/t$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
8	Semua elemen diperkaku lainnya	$b/t$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
9	PSB bulat	$b/t$	$0,11 \frac{E}{F_y}$	

Sumber: SNI 1729:2020 dan AASHTO 2017

### 2.13.3. Kuat Tekan Nominal (*Compressive Resistance*)

Perencanaan kapasitas batang tekan umumnya didasarkan pada klasifikasi penampang yang ditinjau, yaitu penampang kompak atau non-kompak. Perilaku penampang dibagi menjadi tiga kategori: tekuk lentur (*flexural buckling*), tekuk torsi (*torsional buckling*), dan tekuk lentur-torsi (*flexural-torsional buckling*) (AASHTO 2017):

$$P_r = \phi_c F_{cr} A_g \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana :

$P_n$  : Kapasitas tekan penampang (tekuk lentur, tekuk torsi, tekuk lentur-torsi) (N)

$\phi_c$  : Faktor tahanan untuk kondisi tekan, 0,95

Secara umum, nilai  $P_n$  ditentukan berdasar (AASHTO 2017),

Jika  $\frac{KL}{r} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ , maka,

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \right] F_y \dots\dots\dots (2.38)$$

Jika  $\frac{KL}{r} > 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ , maka,

$$F_{cr} = 0,877F_e \dots\dots\dots (2.39)$$

Dimana :

$F_e$  : tegangan tekuk elastis (tekuk lentur, tekuk torsi atau tekuk lentur-torsi) / *elastic critical buckling resistance* (N)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r_s}\right)^2} \dots\dots\dots (2.40)$$

Dimana :

$K$  : faktor panjang efektif batang (Gambar 2.48)

$L$  : panjang batang (mm)

$r_s$  : jari-jari girasi penampang (mm)

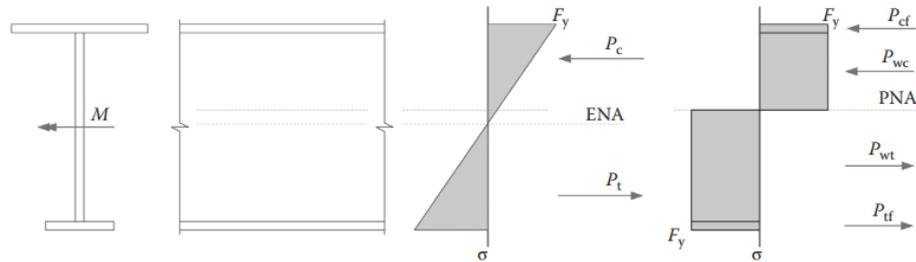
Penggunaan rumus diatas memberikan karakteristik tekuk yang ditinjau, yaitu tekuk inelastis (rumus 1) dan tekuk elastis (rumus 2).

## 2.14. Batang Lentur (Flexual Member)

Batang lentur memikul beban tegak lurus dari batang atau bagian yang diletakkan secara horisontal. Akibatnya, perilaku lentur menjadi dominan dan penampang mengalami dua jenis gaya: tekan di atas garis gaya dan tarik di bawah garis gaya. Balok baja dengan sifat duktail akan mengalami perubahan kondisi geometri jika diberi beban, tetapi setelah beban dilepas, kondisi geometri akan kembali ke kondisi elastis. Sebaliknya, jika kondisi plastis diberi beban, batang akan rusak dan tidak akan kembali ke posisi semula.

### 2.14.1. Klasifikasi Elemen Penampang (Rasio Lebar-Tebal dan Klasifikasinya)

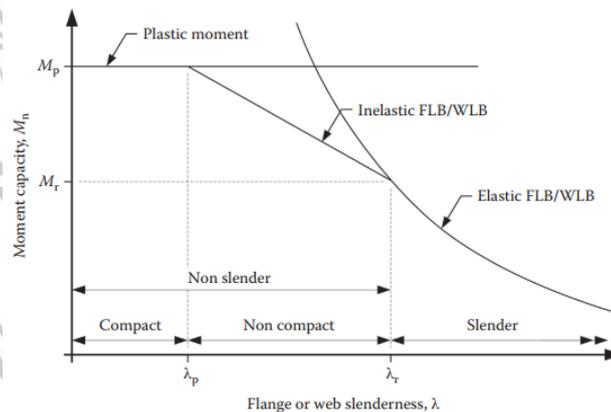
Tahap awal dalam menentukan struktur batang lentur adalah klasifikasi profilnya, yang memungkinkan penampang diklasifikasikan sebagai kompak, non-kompak, atau langsing. Klasifikasi ini digunakan untuk menentukan apakah penampang ekonomis atau tidak terhadap gaya dalam yang bekerja. Profil kompak, atau compact, adalah profil dengan struktur geometri yang paling efisien karena mereka dapat mencapai momen plastis. Karena itu, profil kompak lebih ekonomis.



Gambar 2. 31 Kondisi Leleh dan Plastis pada Penampang  
(sumber: Bridge Engineering Handbook Second Edition, Fundamental, 2014)

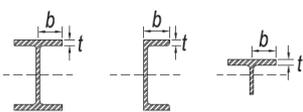
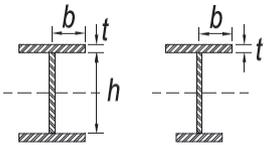
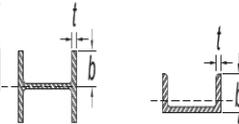
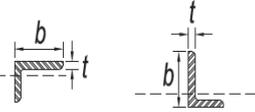
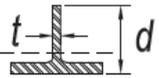
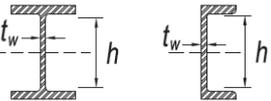
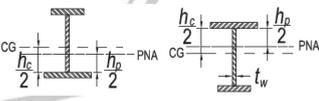
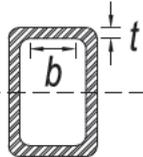
Penampang non-kompak (*non-compact*) mempunyai tingkat efisiensi yang Profil kompak memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada penampang non-kompak atau non-compact. Karena penampang akan mengalami tekukan lokal sebelum penampang plastis penuh terbentuk ketika beban mencapai tegangan leleh. Oleh karena itu, kapasitas momen penampangnya adalah  $M_y < M_p$ .

Profil penampang langsing, atau slender, memiliki tekuk pada penampang sebelum tegangan leleh tercapai, yang membuatnya paling tidak efisien dari semua klasifikasi penampang. Karena itu, kapasitas momen penampangnya adalah  $M < M_y$ , dan perilaku penampang langsing, non-langsing, dan kompak terhadap kapasitas batang lentur ditunjukkan pada gambar di bawah ini

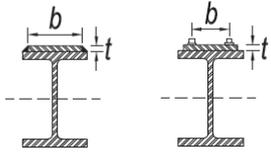
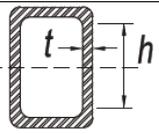
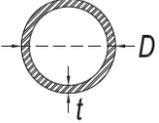


Gambar 2. 32 Perilaku Kapasitas Penampang terhadap Klasifikasi Penampang  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)

Tabel 2. 19 Rasio Tebal terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Kasus	Deskripsi elemen	Rasio ketebalan terhadap lebar	Batasan Rasio Tebal dan Lebar		Contoh
			$\lambda_p$ (kompak)	$\lambda_r$ (non-kompak)	
1	Sayap dari profil I canal panas, kanal, dan T	$b/t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
2	Sayap dari profil tersusun bentuk I simetris ganda dan tunggal	$b/t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,38 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$	
3	Kaki dari siku tunggal	$b/t$	$0,54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Sayap dari semula profil I dan kanal	$b/t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
5	Badan dari T	$d/t$	$0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
6	Badan dari profil I simetris ganda dan kanal	$h/t_w$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
7	Badan dari profil I simetris tunggal	$b/t$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}}{\left(0,54 \frac{M_p}{M_y} - 0,09\right)^2} \leq$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
8	Sayap dari PSB persegi dan boks ketebalan merata	$b/t$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Elemen tanpa pengaku

9	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara deretan sarana penyambung atau las	$b/t$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
10	Badan dari PSB persegi dan boks	$h/t$	$2,42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
11	PSB bulat	$D/t$	$0,07 \frac{E}{F_y}$	$0,31 \frac{E}{F_y}$	

Sumber: SNI 1729 : 2020

**2.14.2. Kekuatan Nominal Penampang**

Secara umum, kekuatan nominal penampang ditentukan berdasarkan klasifikasi penampang tersebut. Maka dari itu, penentuan kapasitas batang lentur secara umum (*flexural member*) adalah sebagai berikut :

$$M_u \leq \phi_f M_n \dots\dots\dots (2.41)$$

Dimana:

$M_u$  : adalah kuat lentur perlu (*momen ultimate*) yang terjadi pada penampang

$\phi_f$  : faktor tahanan lentur, diambil sebesar 0,9

$n$  : kuat lentur nominal penampang yang ditinjau berdasar bentuk geometri penampang.

SNI 1729:2020 menetapkan jarak minimum dan maksimum yang diperlukan untuk penambatan lateral pada penampang yang mengalami tekuk torsi. Oleh karena itu, perhitungan untuk menemukan batasan-batasan pengaku lateral diperlukan sebelum menentukan kapasitas lentur terhadap pengarus tekuk lateral.

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.43)$$

Dimana	:
$L_b$	: Jarak antar breising (mm)
$L_p$	: Pembatasan panjang tidak dikekang secara lateral untuk kondisi batas leleh (mm)
$L_r$	: pembatasan panjang tidak dikekang secara lateral untuk kondisi batas tekuk torsi-lateral inelastis (mm)
$r_y$	: radius girasi penampang terhadap sumbu lemah
$E$	: modulus elastis baja, 200.000 MPa
$F_y$	: kuat leleh minimum, (MPa)
$r_{ts}$	: $\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}$
$J$	: konstanta torsi (mm <sup>4</sup> )
$o$	: jarak antara titik berat elemen sayap (mm)
$C$	: untuk profil I simetris ganda, $c = 1$

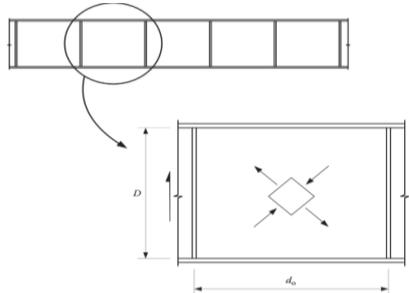
### 2.15. Kuat Geser Nominal (Shear Nominal)

Balok memiliki komponen seperti sayap dan badan yang didesain untuk lentur, dengan sayap bertanggung jawab atas perilaku lentur. sementara badan (*web*) berfungsi untuk menahan gaya geser yang terjadi pada member. Oleh karena itu, batang juga harus dievaluasi berdasarkan gaya geser penampang. Kuat geser nominal biasanya harus memenuhi persyaratan berikut:

$$V_u \leq \phi_v V_n \dots \dots \dots (2.44)$$

Dimana	:
$V_u$	: gaya geser yang terjadi pada penampang
$\phi_v$	: faktor tahanan geser, diambil sebesar 0,9
$V_n$	: kuat geser nominal balok berdasar kondisi (a dan b)

Dua perilaku geser yang terjadi pada penampang adalah berdasarkan komponen struktur dengan badan yang tidak diperkaku. Pertama, perilaku pasca tekuk pelat badan dengan pelat pengaku tegak ketika dibebani menyebabkan pelat saling tarik dan tekan pada pelat yang di bingkai (diperkaku). Penampang dengan web atau badan yang langsing biasanya mengalami perilaku aksi tekanan tanah ini.



Gambar 2. 33 Pengalihan Gaya Geser Akibat Beban yang Bekerja  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)

## 2.16. Kombinasi Aksial dan Lentur

Kombinasi gaya aksial dan lentur yang bekerja pada batang/*member* harus di evaluasi sedemikian rupa sehingga dapat memenuhi ketentuan yang dipersyaratkan:

a. Bila  $\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad \dots \dots \dots (2.45)$$

b. Bila  $\frac{P_r}{P_c} < 0,2$

$$\frac{P_r}{2.P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad \dots \dots \dots (2.46)$$

Dimana :

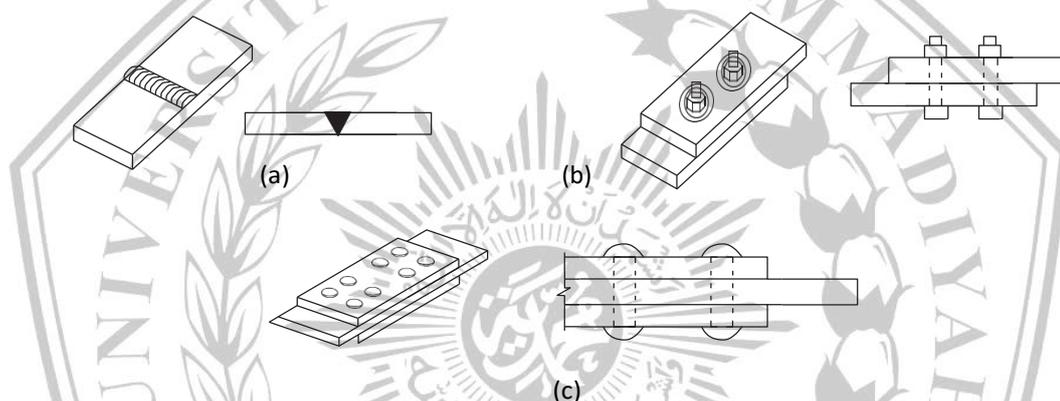
$P_r$  : kekuatan aksial perlu (N, Kn)

$P_c$  : kekuatan aksial tersedia (N, Kn)

## 2.17. Sambungan (Connection)

Jembatan baja terdiri dari beberapa elemen primer dan sekunder yang terhubung melalui sambungan. Sambungan berfungsi untuk menyalurkan gaya dalam yang dihasilkan oleh beban kerja dan kemudian disalurkan ke tumpuan jembatan. Secara umum, sambungan harus memenuhi persyaratan berikut: keamanan, realibilitas, mudah dalam proses pabrikasi, mudah pemasangan, dan ekonomis dalam hal penggunaan material dan biaya (Tehuriko, 2017). pada jembatan terbuat dari baja. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.34, ada

beberapa jenis sambungan yang sering digunakan, termasuk paku keling (rivet connection), sambungan baut (bolt connection), dan sambungan las (welding connection). Sambungan baut sudah digunakan sejak pertengahan abad ke-18, tetapi sambungan paku keling sudah digunakan sebelum abad ke-20. Pada abad ke-20, sambungan las mulai digunakan untuk menggantikan sambungan paku keling saat membangun jembatan. Namun, pada pertengahan tahun 1900-an, baut berkualitas tinggi dibuat. Penemuan ini mengubah sambungan jembatan, menggunakan baut berkualitas tinggi pada hampir semua bagian jembatan (Teruhiko, 2017).



Gambar 2. 34 Tipe-Tipe Sambungan pada Jembatan (A) Sambungan Las, (B) Sambungan Baut, (C) Sambungan Paku Keling (sumber: Teruhiko, 2017)

### 2.18. Sambungan Baut (Bolt Connection)

Dibandingkan dengan metode penyambungan lainnya, sambungan baut adalah jenis yang paling sering digunakan saat membuat jembatan. Ini karena baut yang digunakan adalah baut mutu tinggi, yang memiliki mutu dua kali lebih besar daripada baut jenis biasa. Sistem dengan baut dipilih karena pengawasannya lebih mudah, sehingga hasilnya lebih terjamin. Namun, sambungan baut menghadapi beberapa masalah penting yang harus diperhatikan, termasuk overloading, overturning, dan kerusakan korosi (Teruhiko, 2017).

### 2.18.1. Persyaratan Umum Sambungan Baut

Dalam merencanakan sambungan baut, maka ada beberapa persyaratan khusus yang telah ditetapkan oleh peraturan AISC 360-16 dan AASHTO 2017 sebagai berikut:

#### 1. Persyaratan spasi antar baut

Spasi antar baut pada sambungan terbagi menjadi dua jenis yaitu jarak tepi minimum dan jarak antar baut minimum.

##### a. Persyaratan jarak tepi minimum dan maksimum

Jarak tepi minimum baut berdasar AASHTO 2017 pada Tabel 2.19 .

Tabel 2. 20 Persyaratan Jarak Tepi Minimum Baut

Diameter Baut (mm)	Jarak Tepi Minimum (mm)
M16	22
M20	26
M22	28
M24	30
M27	34
M30	38
M36	46
$\geq M36$	1,25d

Sumber: AASHTO 2017

Adapun jarak maksimum tepi pada baut untuk jembatan dijelaskan 8 kali tebal pelat terkecil atau 127 mm (5 in).

##### b. Persyaratan jarak antar baut

Persyaratan minimum spasi ( $s$ ) pada jembatan menurut AASHTO 2017 adalah  $s \geq 3d$ . persyaratan ini bukan sekedar jaminan *safety* (kemanan) namun juga agar memudahkan pemasangan di lapangan. Persyaratan maksimum spasi ( $s$ ) dibatasi sebesar  $s \leq 12t$  min (tebal pelat paling tipis) atau maksimal  $24t$ . dari perhitungan tersebut, batang yang digunakan dari perhitungan paling minimum.

#### 2. Persyaratan lubang baut

Berdasar AASHTO 2017, persyaratan lubang pada baut terbagi menjadi 4 kelompok yaitu standar, kebesaran (*oversized*), slot pendek (*short slot*) dan slot panjang (*long slot*) . Berikut ini standarisasi diameter lubang baut terhadap jenis lubang baut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. 21 Standarisasi Diameter Lubang Baut

Dia Baut (mm)	Standart (dia)	Oversize (dia)	Slot-Pendek (bxh)	Slot-Panjang (bxh)
M16	18	20	18x22	18x40
M20	22	24	22x26	22x50
M22	24	28	24x30	24x55
M24	27	30	27x32	27x60
M27	30	35	30x37	30x67
M30	33	38	33x40	33x75
$\geq M36$	$d+3$	$d+8$	$(d+3) \times (d+10)$	$(d+3) \times 2.1/2d$

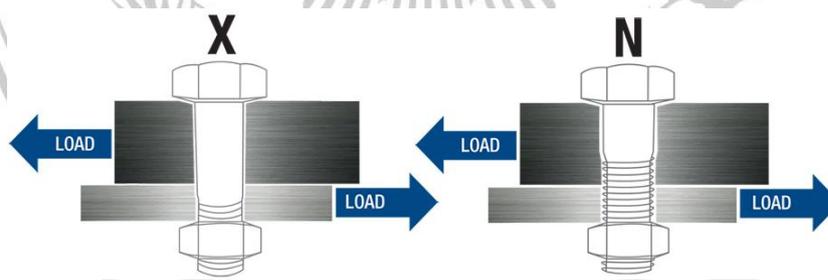
Sumber: AASHTO 2017

### 2.18.2. Tipe Sambungan dan Kekuatan Baut

Dari berbagai jenis sambungan yang ada dan pembebanan yang bekerja pada sambungan Sambungan hanya menggunakan gaya geser dan tarik atau kombinasi keduanya. Oleh karena itu, sambungan dapat dikategorikan menjadi sambungan tipe geser, sambungan tipe tarik, atau sambungan interaksi tarik dan geser. Perilaku keruntuhan baut yang disebabkan oleh gaya geser terbagi menjadi dua: mekanisme slip-kritis dan tumpu.

#### 2.18.2.1. Sambungan Baut Tipe Geser (*Shear Failure*)

Sambungan baut tipe geser dirancang berdasarkan gaya geser yang bekerja pada penampang. Gaya geser yang bekerja pada penampang juga dipengaruhi oleh bidang geser (shear plane) sambungan dan tebal pelat sambungan.



Gambar 2. 35 Ilustrasi Ulir Baut Berada pada Bidang Geser dan Di Luar Bidang Geser (sumber: allfastener.com)

Secara umum, ketika drat atau ulir berada di luar bidang geser, kekuatan geser sambungan sebesar  $0,6A_bF_{ub}$ . Namun, ketika drat atau ulir berada di dalam bidang geser, kekuatan geser sambungan akan berkurang sebesar 20% (*Handbook of Bridge Engineering, Second Edition, Fundamental, 2014*). Dengan demikian, kuat

geser baut (satu baut) pada jembatan menurut AASHTO 2017 adalah sebagai berikut:

- a. Apabila ulir berada di luar bidang geser (*shear plane*)

$$\phi_s R_n = 0,56 A_b F_{ub} N_s \dots\dots\dots (2.47)$$

- b. Apabila ulir berada di dalam bidang geser (*shear plane*)

$$\phi_s R_n = 0,45 A_b F_{ub} N_s \dots\dots\dots (2.48)$$

Dimana:

$A_b$  : luas penampang nominal baut ( $\text{mm}^2$ )

$F_{ub}$  : kuat tarik minimum dari baut (MPa)

$N_s$  : jumlah bidang geser per baut (n)

$\phi_s$  : faktor tahanan sambungan tipe geser, diambil sebesar 0,75

#### 2.18.2.2. Sambungan Slip (*Connection Slip*)

Sambungan jembatan tidak boleh slip. Ini diperlukan untuk mencegah kerusakan fatik pada sambungan apabila terjadi mekanisme beban yang berulang dan bertambah dalam jangka waktu yang lama. Jika terjadi slip pada sambungan, sambungan yang bekerja akan menjadi tahanan tumpu di baut. Hal ini pasti dihindari untuk alasan keamanan. Sebagai berikut adalah tahanan slip kritis umum untuk baut (ASHHTO 2017).

$$\phi_s R_n = K_h K_s N_s P_t \dots\dots\dots (2.49)$$

Dimana:

$N_s$  : jumlah bidang geser (jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kontak )

$P_t$  : gaya tarik baut prategang minimum (MPa)

$K_h$  : faktor kondisi lubang baut

$K_s$  : faktor kondisi kekasaran permukaan sambungan

#### 2.18.2.3. Kekuatan Tumbu Baut (*Bolt Bearing*)

Secara umum, baut harus dikencangkan sesuai dengan gaya pra tarik minimum yang ditetapkan oleh ASSHTO 2017. Namun, sesuai dengan penjelasan slip kritis, kekuatan tumpu baut harus dipertimbangkan juga saat merencanakan sambungan baut. Tahanan tumpu dari lubang baut adalah sebagai berikut:

1. Untuk baut tipe standar, *oversize*, slot pendek, maka tahanan tumpu baut adalah sebagai berikut:

a. Apabila jarak antar lubang tidak lebih dari  $2.0d$  dan jarak antara lubang dengan tepi terluar tidak lebih dari  $2.0d$ , maka

$$\phi R_n = 2,4dtF_u \dots\dots\dots (2.50)$$

b. Apabila jarak antar lubang lebih dari  $2.0d$  dan jarak antara lubang dengan tepi terluar lebih dari  $2.0d$ , maka

$$\phi R_n = 1,2L_{ct}F_u \dots\dots\dots (2.51)$$

2. Untuk baut tipe slot panjang, maka tahanan tumpu baut adalah sebagai berikut:

a. Apabila jarak antar lubang tidak lebih dari  $2.0d$  dan jarak antara lubang dengan tepi terluar tidak lebih dari  $2.0d$ , maka

$$\phi R_n = 2,0dtF_u \dots\dots\dots (2.52)$$

b. Apabila jarak antar lubang lebih dari  $2.0d$  dan jarak antara lubang dengan tepi terluar lebih dari  $2.0d$ , maka

$$\phi R_n = L_{ct}F_u \dots\dots\dots (2.53)$$

Dimana:

$d$  : diameter nominal dari baut (mm)

$t$  : tebal pelat sambung (mm)

$F_u$  : Kuat tarik minimum pelat sambung yang ditinjau (MPa)

$L_c$  : jarak bersih (mm) searah gaya, dihitung dari tepi lubang ke tepi pelat terluar (untuk baut pinggir)/jarak bersih antar tepi lubang (untuk baut dalam).

#### 2.18.2.4. Sambungan Baut Tipe Tarik (*Tension Failure*)

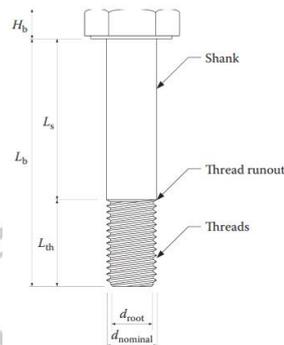
Sambungan tipe tarik biasanya menggunakan elemen tambahan antara member satu dengan yang lainnya. Yang paling umum adalah menempelkan elemen ujung plat pada ujung sambungan. Sambungan tegangan tipe tarik menggunakan tahanan ulir baut dan mur dan tahanan kepala baut, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Menurut ASSHTO 2017, kekuatan tarik baut adalah sebagai berikut:

$$\phi T_n = 0,76A_bF_{ub} \dots\dots\dots (2.54)$$

Dimana :

$A_b$  : luas penampang nominal baut ( $\text{mm}^2$ )

$F_{ub}$  : kuat tarik minimum dari baut (MPa)

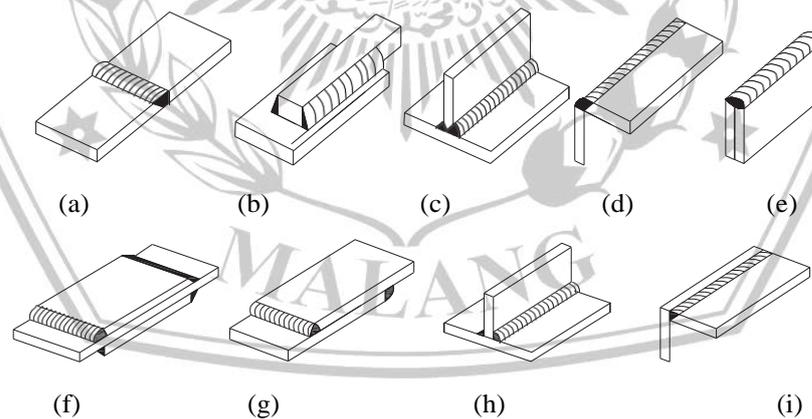


Gambar 2. 36 Parameter Baut

(sumber: Bridge Engineering Handbook, Second Edition, Fundamentals, 2014)

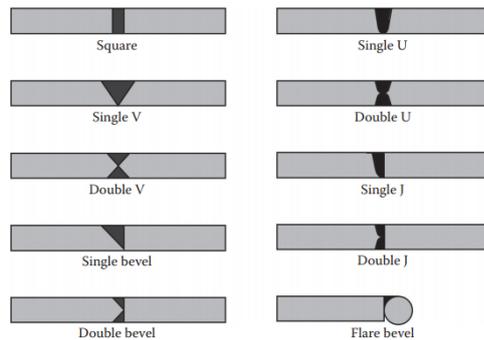
### 2.19. Sambungan Las (*Welded Connection*)

Pada proses pabrikasi atau area konstruksi jembatan, komponen baja disambungkan dengan las, atau welding. Las tumpul (*butt welds*), las sudut (*fillet welds*), las plug, dan lainnya adalah beberapa jenis las yang sering digunakan. Contohnya dapat dilihat pada gambar berikut:

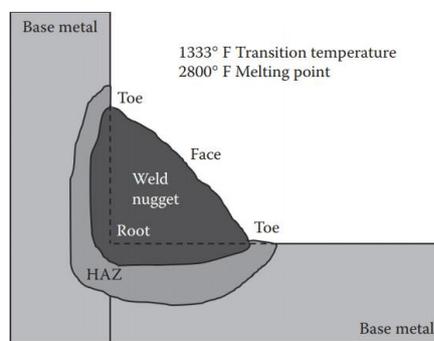


Gambar 2. 37 Tipe Sambungan Las, (A) Las Tumpul (But Joint), (B) *Longitudinal Joint*, (C) *Butt Joint*, (D) *Corner Joint-1*, (E) *Edge Point*, (F) *Transverse Fillet Joint*, (H) *Tee Joint*, (I) *Corner Joint-2*

(sumber: Chen dan duan, 2014)



Gambar 2. 38 Tipe Bentuk Sambungan Las Tumpul (*Groove Weld*)  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)



Gambar 2. 39 Bentuk Penampang Las Sudut  
(sumber: Chen dan Duan, 2014)

Jika las jembatan baja dilakukan di workshop, akan lebih hemat, tetapi jika dilakukan di lapangan, akan sulit untuk memantau kualitas las. Karena itu, lebih baik menggunakan baut saat mengerjakan jembatan di lapangan.

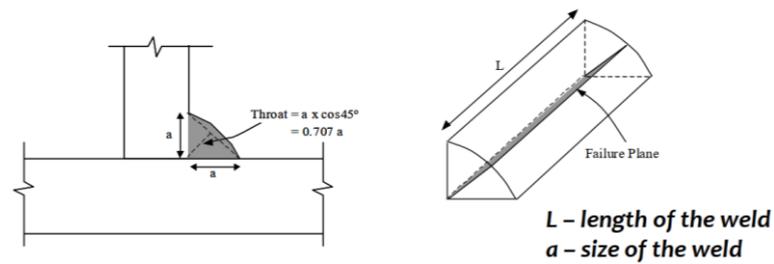
**2.19.1. Kuat Nominal Las Sudut**

Mutu elektroda las dikalikan dengan luasan throat las menentukan kuat nominal las sudut, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.40 Luasan throat las adalah  $0,707w$ , yang dihitung dari luasan las sudut dengan kemiringan  $45^\circ$ , dan kuat nominal las sudut, berdasarkan AISC 360-16, adalah sebagai berikut:

$$\phi R_n = 0,6F_{exx} \cdot 0,7071aL \dots \dots \dots (2.55)$$

Dimana :

- $F_{exx}$  : mutu elektroda las (MPa)
- $a$  : tebal las rencana (mm)
- $L$  : panjang rencana las (mm)



Gambar 2. 40 Ilustrasi Luasan dan Panjang dari Las Sudut  
 (sumber: materi ajar struktur baja Erwin Rommel)

## 2.20. Lendutan (Deflection)

Untuk jembatan lendutan harus diperhitungkan pada balok dan rangka keseluruhan. Menurut AASHTO 2017, persyaratan untuk ijin lendutan adalah sebagai berikut:

- a.  $L/800$  (balok di atas dua tumpuan atau gelagar menerus)
- b.  $L/1000$  (jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki, dengan intensitas pejalan kaki rendah)
- c.  $L/1200$  (jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki, dengan intensitas pejalan kaki sangat signifikan)
- d.  $L/300$  (balok kantilever ujung pada jembatan)