

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Umum

Indonesia merupakan negara maritim yang terdiri dari 70% perairan dan 30% daratan. Wilayah Indonesia dimulai dari Sabang hingga Merauke, dimana seluas wilayah tersebut terdiri dari 17.000 pulau dengan garis pantai lebih dari 99.000 km. Letak geografis negara Indonesia berada di posisi strategis karena diapit oleh dua benua dan dua samudera yang menjadi salah satu jalur perdagangan internasional. Indonesia juga memiliki banyak sungai dengan berbagai ukuran, baik besar maupun kecil.

Sungai-sungai di Indonesia memiliki aliran dengan panjang ratusan meter dengan sejarah dan keunikan tersendiri. Beberapa sungai terpanjang yang dimiliki oleh Indonesia diantaranya yaitu Sungai Kapuas di Provinsi Kalimantan Barat dengan panjang 1.143 km, Sungai Mahakam di Kalimantan Timur dengan panjang 920 km, Sungai Barito terbentang dari Provinsi Kalimantan Tengah hingga Kalimantan Selatan sepanjang 909 km, Sungai Batanghari di Provinsi Sumatera Barat dengan panjang 800 km, dan Sungai Musi di Provinsi Sumatera Selatan dengan panjang 750 km. Terpisahnya sebuah wilayah oleh keadaan tersebut, membutuhkan sebuah infrastruktur yang dapat mempermudah akses lalu lintas tiap daerah yang disebut dengan jembatan.

Jembatan secara umum merupakan suatu konstruksi yang bertujuan untuk menghubungkan dua wilayah yang terpisah oleh lembah, sungai, danau, jalan raya, dan rintangan lainnya. Sebelum merencanakan sebuah jembatan terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan, seperti aspek kebutuhan lalu lintas, aspek teknis, dan aspek estetika (Supriyadi & Muntohar A., 2007). Selain itu, dalam merencanakan jembatan juga harus mempertimbangkan berbagai macam bentuk dan material yang akan digunakan, serta segi ekonomis yang disesuaikan dengan ilmu pengetahuan dan teknologi konstruksi saat ini.

2.2 Jembatan Busur (*Arch Bridge*)

Jembatan busur adalah jembatan dengan struktur kepala yang dilengkungkan seperti kurva. Jembatan dengan tipe struktur seperti ini lebih ekonomis dari tipe jembatan lainnya serta merupakan struktur jembatan pertama didunia dalam merencanakan jembatan. Jembatan ini memiliki batas bentang dengan panjang maksimum 500 m, serta mengandalkan gelagar lengkung (busur) dan batang pengantung dalam menahan beban yang bekerja (Budiono et al., 2016). Namun, selain ekonomis dan memiliki batas bentang, desain dari bentuk lengkung tersebut berfungsi untuk meneruskan berat jembatan dan sebagian beban yang diterima menuju hanger, kemudian diteruskan ke abutmen di kedua sisinya.

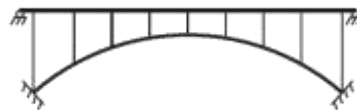
2.2.1 Jenis-jenis Jembatan Busur

Seperti pada tipe jembatan lainnya, jembatan busur diklasifikasikan berdasarkan posisi lantai kendaraan, struktur lengkung, dan lainnya.

a) Klasifikasi berdasarkan posisi lantai kendaraan

a. *Deck arch bridge*

Struktur jembatan tipe *deck arch* yaitu letak lantai kendaraan berada di atas lengkung busur. Sehingga beban yang diterima disalurkan langsung menuju spandrel ke sisi lengkung jembatan. Tipe jembatan ini dapat menahan gaya aksial dan lentur akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya. Spandrel sendiri merupakan jarak antara lantai kendaraan dengan sisi lengkung jembatan. Jenis jembatan ini dapat digunakan sebagai akses jalan menuju kawasan menanjak atau penguungan.

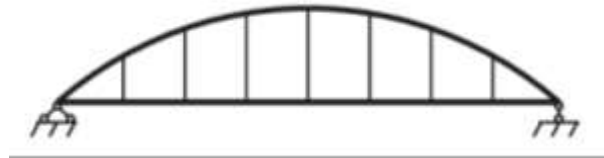


Gambar 2. 1 *Deck Arch Bridge*
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

b. *Trough arch bridge*

Struktur jembatan tipe *through arch* yaitu letak lantai kendaraan berada di

antara ujung kaki pelengkung. Sehingga beban yang diterima disalurkan ke struktur pelengkung jembatan melalui hanger. Jenis jembatan ini biasa digunakan pada kondisi lapangan dengan tanah yang kurang baik.



Gambar 2. 2 *Through Arch Bridge*
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

c. *A half-trough arch bridge*

Struktur jembatan tipe *a half-trough arch* yaitu letak lantai kendaraan berada di tengah, antara puncak lengkung dengan ujung kaki pelengkung jembatan.

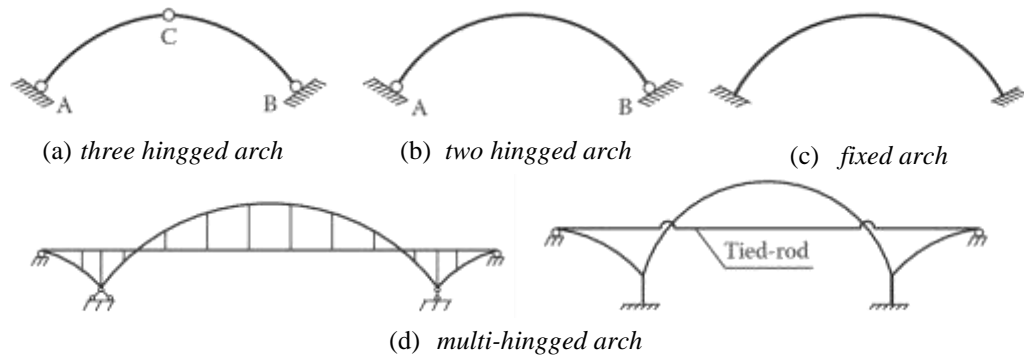


Gambar 2. 3 *A Half-Through Arch Bridge*
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

b) Klasifikasi berdasarkan perletakan

Menurut buku “*Bridge Engineering Handbook Second Edition, Fundamental 2013*”, jembatan busur juga dapat diklasifikasikan berdasarkan perletakan jembatan seperti berikut:

- a. *Three-hingged arch*
- b. *Two-hingged arch*
- c. *Fixed arch*
- d. *Multi-hingged arch*

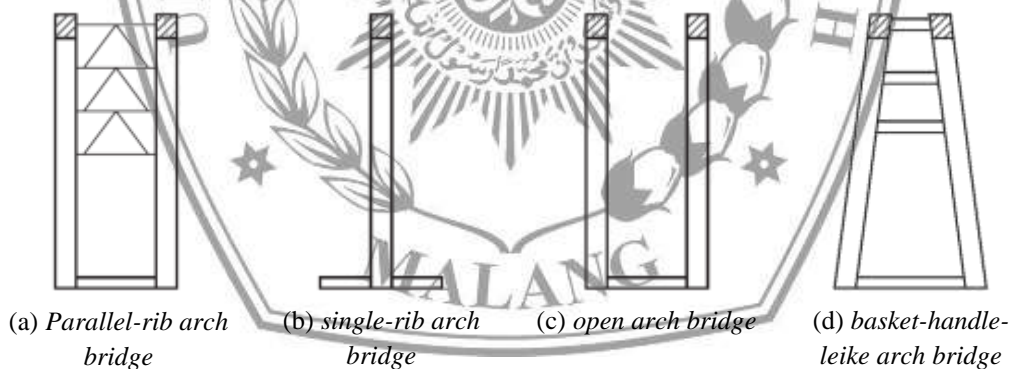


Gambar 2. 4 Klasifikasi Jembatan Busur Berdasarkan Perletakan
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

c) Klasifikasi berdasarkan *rib form*

Menurut buku “*Bridge Engineering Handbook Second Edition, Fundamental 2013*”, jembatan busur juga dapat diklasifikasikan berdasarkan *rib form* jembatan seperti berikut:

- a. *Parallel-rib arch bridge*
- b. *Single-rib arch bridge*
- c. *Open arch bridge*
- d. *Basket-handle-like arch bridge*



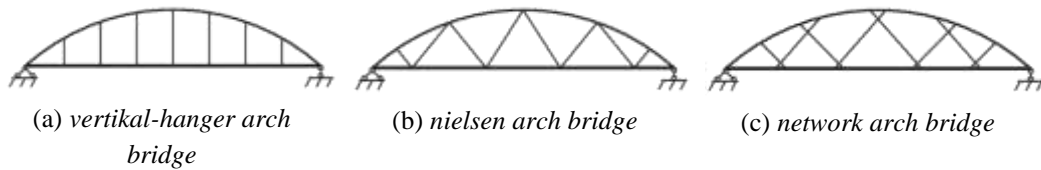
Gambar 2. 5 Klasifikasi Jembatan Busur Berdasarkan *Rib Form* Jembatan
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

d) Klasifikasi berdasarkan letak hanger

Menurut buku “*Super Structure Design Bridge*” (Chen & Duan, 2013) jembatan busur juga dapat diklasifikasikan berdasarkan pengaturan hanger jembatan seperti berikut:

- a. *Vertical-hanger arch bridge*
- b. *Nielsen arch bridge*

c. *Network arch bridge*



Gambar 2. 6 Klasifikasi Jembatan Busur Berdasarkan Letak Hanger
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

2.2.2 Cara Pemilihan Bentuk Busur Jembatan

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi desain perencanaan jembatan busur. Secara umum, faktor tersebut berkaitan dengan segi fungsi, segi ekonomi, segi keamanan, segi estetika, segi lalu lintas, kondisi pondasi, prosedur ereksi, syarat izin, dan lain sebagainya. Oleh karena itu terdapat beberapa hal yang harus dipertimbangkan juga dalam memilih bentuk busur jembatan yaitu sebagai berikut:

a) **Kondisi Geologi Tanah Dasar Lokasi Rencana**

Kondisi geologi tanah sebagai lokasi rencana pembangunan jembatan, harus mempertimbangkan beberapa hal yang meliputi:

- a. Tebing dengan ketinggian yang curam, posisi yang tinggi, serta kondisi tanah yang bagus, sebaiknya menggunakan desain busur dengan posisi lantai kendaraan di atas sisi lengkung (*deck arch bridge*).
- b. Jika kaki jembatan direncanakan terendam air, maka desain jembatan lebih baik menggunakan tipe *a half-through arch bridge*.
- c. Jika kondisi tanah yang dimiliki kurang baik dalam menerima gaya yang bekerja, lebih baik menggunakan desain jembatan tipe *deck arch bridge*.

b) **Bentang Jembatan Rencana**

Bentang jembatan yang direncanakan tentunya menyesuaikan dengan keadaan aktual sesuai lokasi rencana. Oleh karena itu terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam memilih tipe jembatan sebagai berikut:

- a. Bentang dengan panjang 60 – 250 m, sebaiknya menggunakan tipe jembatan dinding penuh (*box girrder*).
- b. Bentang dengan panjang 250-500 m, sebaiknya menggunakan tipe jembatan rangka pada bagian struktur busur.
- c) **Tingkat Beban Rencana**

Tingkat beban rencana dalam merencanakan jembatan busur turut mempengaruhi dalam pemilihan tipe busur yang tepat, yaitu:

- a. Jika beban yang diterima oleh struktur jembatan itu besar, sebaiknya menggunakan tipe jembatan busur rangka pada bagian struktur busur.
- b. Jika beban yang diterima oleh struktur jembatan tidak terlalu besar, dapat menggunakan tipe jembatan busur dengan profil box.

d) Keindahan/Estetika Jembatan

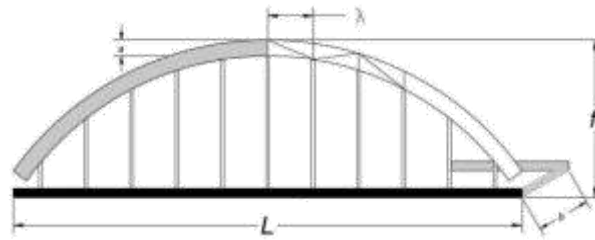
Aspek estetika jembatan merupakan faktor yang cukup penting pula dalam merencanakan sebuah jembatan. Kesesuaian estetika dan arsitektural dapat memberikan nilai lebih pada sebuah jembatan. Nilai estetika dapat menjadi ciri khas dari jembatan itu sendiri maupun *icon* dari kota/wilayah yang bersangkutan, serta dapat menggambarkan nilai futuristik dari dunia konstruksi. Berikut hal yang dapat dipertimbangkan dalam memilih tipe busur jembatan dari aspek estetika:

- a. Untuk kesan langsing, dapat menggunakan tipe busur dengan penampang tengah yang lebih kecil.
 - b. Untuk kesan tenang, dapat menggunakan tipe busur dengan profil box.
 - c. Untuk kesan megah, dapat menggunakan tipe busur dengan kombinasi rangka baja pada bagian busurnya.
- e) *Clearance* Jembatan Rencana

Clearance jembatan dibagi menjadi dua bagian, yaitu atas dan bawah. Untuk *clearance* bagian atas merupakan jarak bersih antara lantai kendaran dan ikatan angin paling bawah pada jembatan. Untuk *clearance* bagian bawah merupakan jarak bersih antara muka air sungai dan struktur bawah jembatan.

2.2.3 Geometrik Jembatan Busur

Bagian yang tak kalah penting dalam perencanaan sebuah jembatan busur adalah menentukan geometrik jembatan tersebut. Struktur utama jembatan busur adalah bagian yang menerima gaya dalam kemudian diteruskan ke tumpuan jembatan. Berdasarkan buku *Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Fundamental 2013*, beberapa syarat yang harus terpenuhi yaitu:



Gambar 2. 7 Desain Geometrik Jembatan Busur
(Sumber: Penulis)

a. Tinggi busur (f)

Menurut (Fitrisari et al., 2020) dalam “Desain Jembatan Pelengkung” menyebutkan bahwa berdasarkan rumus Hool & Kine, syarat menentukan tinggi busur yaitu:

$$\frac{1}{7} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{4} \quad (2.1)$$

Dimana:

f : tinggi jembatan busur

L : bentang jembatan busur

b. Tinggi tampang busur rangka (a)

Syarat menentukan tinggi tampang busur (a) yaitu:

$$\frac{1}{40} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{23} \quad (2.2)$$

Dimana:

t : tinggi tampang jembatan busur

L : bentang jembatan busur

c. Lebar segmen (λ)

$$\lambda \leq \frac{L}{15} \quad (2.3)$$

Dimana:

λ : lebar segmen jembatan busur

L : bentang jembatan busur

d. Lebar jembatan (b)

Syarat menentukan lebar jembatan yaitu:

$$\frac{b}{L} \leq \frac{1}{10} \quad (2.4)$$

Dimana:

b : lebar jembatan busur

L : bentang jembatan busur

e. Panjang penggantung busur (y_n)

Syarat menentukan panjang penggantung busur yaitu:

$$y_n = \frac{4.f.x.(L-x)}{L^2} \quad (2.5)$$

f : tinggi jembatan busur

x : beda tinggi antar kabel/*hanger* jembatan busur

L : bentang jembatan busur

2.3 Bagian Struktur Atas Jembatan Busur (*Superstructure*)

Struktur atas (*superstructure*) dari jembatan busur yaitu terdapat beberapa bagian penyusun. Pada tipe jembatan *trough arch*, struktur atas yang dimaksud yaitu:

- a. Trotoar
- b. Tiang railing dan pipa sandaran
- c. Lantai kendaraan jembatan
- d. Gelagar memanjang
- e. Gelagar melintang/diafragma
- f. Ikatan angin/ikatan lateral
- g. Tali penggantung/*hanger*
- h. Rangka utama (balok busur)
- i. Tumpuan/*bearing*
- j. Sambungan

2.4 Karakteristik Material Baja (*Steel*)

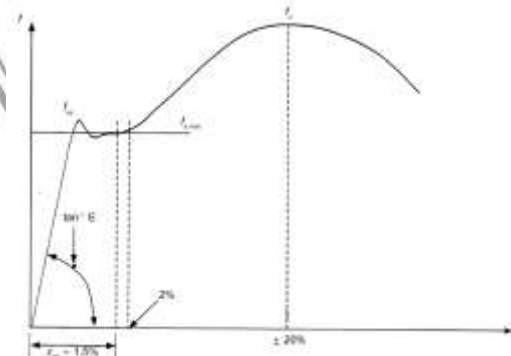
Tahapan penting dalam merencanakan sebuah bangunan yaitu memilih jenis material yang akan digunakan. Material yang selama ini sudah banyak dikenal dalam dunia konstruksi yaitu baja, beton bertulang serta kayu (Setiawan, 2008). Pada perencanaan jembatan busur tipe *trough arch* ini, material utama yang

digunakan adalah baja. Keunggulan yang dimiliki oleh baja sebagai material konstruksi yaitu dari segi kekuatan yang tinggi, keawetan, sifat yang elastis, daktilitas tinggi, serta beberapa keuntungan lainnya.

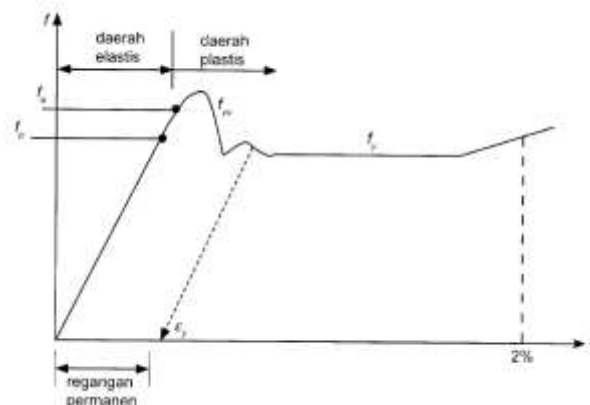
Baja sudah dikenal sejak abad ke-18 dan mulai digunakan sebagai material konstruksi Jembatan Busur Coalbrookdale di Inggris. Baja konstruksi juga terbagi dalam beberapa jenis berdasarkan kandungan baja yang dimiliki, yaitu:

1. *Low carbon* ($C = 0,03\% - 0,35\%$)
2. *Medium carbon* ($C = 0,35\% - 0,55\%$)
3. *High carbon* ($C = 0,55\% - 1,70\%$)

Untuk mengetahui sifa-sifat mekanis baja, maka seorang *engineer* perlu memahami perilaku dari struktur baja yaitu dengan melakukan uji tarik terhadap suatu benda uji material baja. Uji tekan terhadap material tidak dilakukan karena tidak dapat menghasilkan data akurat akibat beberapa hal seperti adanya potensi tekuk pada benda uji, serta perhingan tegangan yang terjadi dapat menyebabkan ketidakstabilan pada benda uji. Berdasarkan Gambar 2.8 dan 2.9 menjelaskan bahwa hasil dari uji tarik dilakukan pada suhu kamar dengan memberikan laju regangan yang normal. Tegangan nominal (f) yang dihasilkan pada benda uji diplot pada bagian vertikal, sedangkan regangan (ϵ) merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula ($\Delta L/L$) yang diplot pada subu horizontal.



Gambar 2. 8 Kurva Hubungan Tegangan (f) dan Regangan (ϵ)
(Sumber: Setiawan, 2008)



Gambar 2. 9 Kurva Hubungan Tegangan (f) dan Regangan (ϵ) yang Diperbesar
(Sumber: Setiawan, 2008)

Dimana:

f_p : batas proporsional

f_e : batas elastis

f_{yu}, f_y : tegangan leleh atas dan bawah

f_u : tegangan putus

ϵ_{sb} : regangan saat mulai terjadi efek *strain-hardening* (penguatan regangan)

ϵ_u : regangan saat tercapainya tegangan putus

Titik-titik penting pada gambar di atas membagi kurva tegangan-regangan menjadi beberapa daerah sebagai berikut.

1. Daerah linear antara 0 dan f_p , dalam daerah tersebut berlaku Hukum Hooke , kemiringan dari bagian kurva yang lurus disebut sebagai Modulus Elastisitas atau Modulus Young, $E = (f/\epsilon)$.
2. Daerah elastis antara 0 dan f_e , pada daerah tersebut jika beban dihilangkan maka benda uji akan kembali ke bentuk semula atau dikatakan bersifat elastis.
3. Daerah plastis yang dibatasi regangan antara 2% hingga 1,2 – 1,5 %, pada bagian tersebut regangan mengalami kenaikan akibat tegangan konstan sebesar f_y . Daerah tersebut juga menunjukkan tingkat daktiliras material baja. Pada baja mutu tinggi juga memiliki daerah plastis namun tegangan masih mengalami kenaikan.
4. Daerah penguatan regangan (*strain-hardening*) antara ϵ_{sb} dan ϵ_u . Untuk regangan lebih besar dari 15 hingga 20 kali regangan elastis maksimum,

tegaangan kembali mengalami kenaikan namun dengan kemiringan yang lebih kecil daripada daerah elastis. Daerah tersebut disebut daerah penguatan regangan (*strain-hardening*) yang berlanjut hingga tegangan putus (E_{st}).

Adapun sifat-sifat mekanik material baja disajikan dalam Tabel 2.1 dan 2.2 berikut.

Tabel 2. 1 Sifat-sifat Mekanis Material Baja

Indikator	Nilai
Modulus Elastisitas (E)	200.000 MPa
Modulus Geser (G)	80.000 MPa
Angka Poisson (μ)	0,30
Koefisien Muai Panjang (α)	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

(Sumber: Setiawan, 2008)

Tabel 2. 2 Sifat-sifat Mekanis Material Baja Lainnya

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum, f_u (MPa)	Tegangan Leleh Minimum, f_y (MPa)	Regangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

(Sumber: Setiawan, 2008)

2.5 Desain Metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*)

Load and Resistance Factor Design (LRFD) merupakan metode perencanaan struktur baja dengan kondisi batas/*limit states design*. Konsep dari metode LRFD dianggap jauh lebih rasional dengan berdasarkan pada konsep probabilitas karena merupakan cara analisa yang paling kompleks. Metode ini memerlukan data-data mengenai distribusi probabilitas dari tiap variabel acak seperti tahanan, beban, dan lain-lain, serta korelasi antar variabel.

Beban yang dipakai pada metode LRFD merupakan beban yang telah dikalikan dengan *load factor* dari hasil penelitian statistik, serta telah dijadikan peraturan/code sesuai instansi yang berwenang. Faktor beban yang digunakan tergantung dari nilai risiko beban tersebut, sehingga faktor beban nilainya selalu $\geq 1,0$. Demikian pula dengan material yang pakai perlu dilakukan reduksi terhadap kekuatannya, karena pengurangan pada kekuatan material disebabkan akibat

ketidaksempurnaan saat proses fabrikasi. Maka, faktor reduksi kekuatan material nilainya selalu $\geq 1,0$.

Adapun analisa struktur yang dapat dilakukan secara elastis maupun plastis. Namun, tetap merujuk pada kondisi batas struktur ultimate berupa kondisi leleh, tekuk, dan fraktur. Sehingga dalam perencanaan struktur dan komponen-komponen yang dilakukan harus memenuhi persyaratan:

$$\phi R_n \geq \Sigma \eta_i \gamma_i Q_i \quad (2.6)$$

Dimana:

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

ϕ : faktor keamanan untuk kekuatan nominal struktur (faktor reduksi struktur)

$\Sigma \eta_i \gamma_i Q_i$: kombinasi jenis beban yang dipikul oleh struktur rancangan. Dimana faktor keamanan diberlakukan baik terhadap beban maupun kekuatan struktur.

2.6 Pembebanan Jembatan

Pembebanan pada jembatan direncanakan berdasarkan peraturan yang berlaku yaitu SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan. Dalam merencanakan jembatan harus disesuaikan dengan keadaan batas yang diisyaratkan agar dapat mencapai target pembangunan, keamanan, dan aspek layan dengan memperhatikan kemudahan, faktor ekonomi, dan estetika. Aksi yang terjadi pada jembatan akan menghasilkan gaya-gaya pada struktur, sehingga hasil reksi tersebut dapat dierkiran dimensi yang sesuai dari jembatan berdasarkan beban yang bekerja. Maka, dalam menentukan faktor beban dan kombinasi harus memenuhi persamaan berikut (SNI 1725:2016 Pasal 5) :

$$Q = \Sigma \eta_i \gamma_i Q_i \quad (2.7)$$

Dengan mempertimbangkan beberapa hal berikut ini:

Untuk beban-beban dengan nilai maksimum γ_i lebih sesuai maka:

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0,95 \quad (2.8)$$

Untuk beban-beban dengan nilai minimum γ_i lebih sesuai maka:

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1 \quad (2.9)$$

Dimana:

γ_i : faktor beban ke-i

η_i : faktor pengubahan respons berkaitan dengan daktilitas, redudansi, dan klasifikasi opsional

η_D : faktor pengubah respons berkaitan dengan daktilitas

η_R : faktor pengubah respons berkaitan dengan redudansi

η_I : faktor pengubah respons berkaitan dengan klasifikasi operasional

Q_i : pengaruh gaya

a. Daktilitas

Struktur jembatan harus diporsi agar perilaku deformasi inelastis pada keadaan batas ultimit dan ekstrim sebelum mengalami kegagalan. Perangkat disipasi energi gempa dapat digunakan untuk menggantikan sistem pemikul beban gempa, sehingga dari perhitungan faktor pengubah respon sebaiknya dipertimbangkan pada keadaan batas ultimit, maka:

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

$\eta_D = 1,00$ (untuk perencanaan konvensional serta pendetailan 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 lainnya yang termasuk dalam keadaan batas ekstrim/gempa)

b. Redudansi

Jenis pembebanan yang terjadi secara terus menerus digunakan kecuali dengan alasan kuat yang mengharuskan untuk tidak menggunakan struktur tersebut.

Untuk keadaan batas ultimit, maka:

$\eta_R = 1,05$ (untuk komponen non 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 lainnya yang termasuk dalam keadaan batas ekstrim/gempa)

c. Kepentingan operasional

Dalam menentukan jenis kepentingan operasional berdasarkan SNI 1725:2016 harus dilakukan oleh otoritas yang berwenang terhadap jaringan transportasi dan mengetahui kebutuhan operasional. 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 keadaan batas lainnya yang termasuk dalam keadaan batas ekstrim/gempa)

2.6.1 Beban Permanen

Beban permanen merupakan beban yang bersifat tetap atau tidak berubah. Beban permanen juga disebut sebagai beban tetap yang terdiri dari komponen struktur, beban mati tambahan/utilitas, *overlay* aspal jembatan, *wearing surface*/lapisan permukaan jalan. Beban-beban tersebut bekerja selama umur rencana jembatan, besaran yang dihasilkan berupa massa dikalikan dengan percepatan gravitasi (g) dengan standar $9,81 \text{ m/detik}^2$. Besar kerapatan massa dan berat isi berdasarkan SNI 1725:2016 dijelaskan dalam Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Berat Isi Beban Permanen

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m^3)	Kerapatan Massa (kg/m^3)
1	Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing surface</i>)	22,0	2245
2	Besi tuang (<i>cast iron</i>)	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (<i>compacted sand, silt 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>)	22,0	2245
6	Beton ringan (<i>low density</i>)	12,25 – 19,6	1250 – 2000
7	Beton $f'_c < 35 \text{ MPa}$	22,0 – 25,0	2320
	$35 < f'_c < 105 \text{ MPa}$	$22 + 0,022 f'_c$	$2240 + 2,29 f'_c$
8	Baja (<i>steel</i>)	78,5	7850
9	Kayu (ringan)	7,8	800

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (kg/m ³)
10	Kayu keras (<i>hard wood</i>)	11,0	1125

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.6.1.1 Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri (MS) berdasarkan SNI 1725:2016 merupakan berat dari elemen-elemen struktural dan nonstruktural yang terdapat pada jembatan, termasuk berat material yang digunakan. Faktor pembebanan yang digunakan untuk berat sendiri dijelaskan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2. 4 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

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

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.6.1.2 Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Beban mati tambahan/utilitas berdasarkan SNI 1725:2016 merupakan berat dari seluruh material yang membentuk beban dimana merupakan elemen nonstruktural, serta besarnya dapat berubah selama umur rencana jembatan. Faktor pembebanan yang digunakan pada beban mati/utilitas (MA) dijelaskan pada tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Keadaan	Faktor Beban (γ_{MA})		
		Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
			Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 ⁽¹⁾	2,00	0,70
	Khusus	1,00	1,40	0,80

Catatan ⁽¹⁾ : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.6.2 Beban Lalu Lintas

Berdasarkan SNI 1725:2016, beban lalu lintas pada perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur “D” dan beban truk “T”. Untuk beban lajur “D” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang

ekivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung lebar jalur kendaran itu sendiri.

Beban truk “T” merupakan satu kendaraan berat dengan 3 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap gandar terdiri atas dua bidang kotak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk “T” diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

Secara umum, beban “D” akan menjadi beban penerus dalam perhitungan jembatan yang mempunyai bentang sedang sampai panjang. Sedangkan beban “T” digunakan untuk bentang pendek dan lantai kendaraan. Dalam keadaan tertentu, beban “D” yang nilainya telah diturunkan atau dinaikkan dapat digunakan kembali.

2.6.2.1 Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” terdiri atas beban terbagi rata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT). Adapun faktor beban yang digunakan untuk beban lajur “D” dijelaskan pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2. 6 Faktor Beban untuk Beban Lajur "D"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^L)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TD}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Box Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016

Berdasarkan SNI 1725:2016, untuk menentukan nilai intensitas beban “D”, terdiri dari dua bagian yaitu BTR memiliki intensitas q kPa dengan besaran tergantung pada panjang total yang dibebani L sebagai berikut:

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m} : q = 9,0 \text{ kPa} \quad (2.10)$$

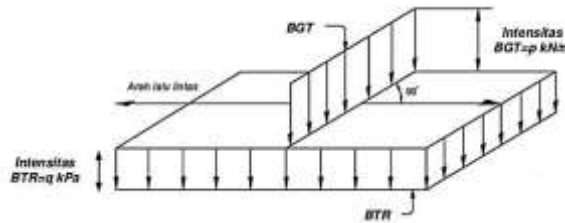
$$\text{Jika } L > 30 \text{ m} : q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad (2.11)$$

Dimana:

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

L : panjang total jembatan yang dibebani (m)

Untuk BGT ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas dengan intensitas p sebesar 49,0 kN/m. Untuk memperoleh nilai momen lentur negatif maksimum menerus, BGT kedua yang identik harus diletakkan pada posisi arah melintang jembatan pada bentang lainnya seperti Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2. 10 Beban Lajur "D"
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

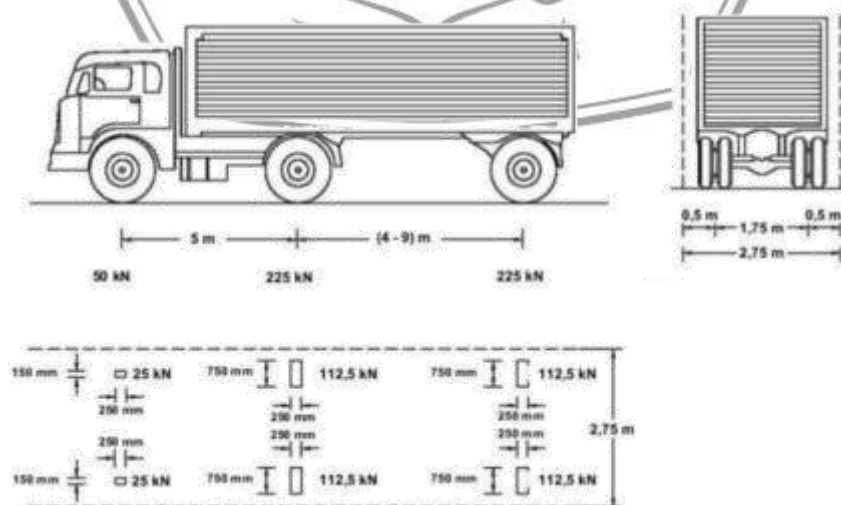
2.6.2.2 Beban Truk "T"

Beban truk merupakan beban lalu lintas yang bekerja pada struktur lantai kendaraan jembatan. Menurut SNI 1725:2016, beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban lajur "D" karena terbatas untuk perencanaan pelat lantai. Untuk faktor beban yang digunakan seperti pada Tabel 2.7 berikut.

Tabel 2. 7 Faktor Beban untuk Beban Truk "T"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TT})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^L)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TT}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Box Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)



Gambar 2. 11 Pembebanan Truk "T" (500 kN)
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.6.2.3 Faktor Beban Dinamis (FBD)

Faktor beban dinamis merupakan hasil interaksi antara kendaraan bergerak dengan jembatan yang besarnya tergantung pada frekuensi dasar suspensi kendaraan (2 Hz – 5 Hz untuk kendaraan berat) dan getaran lentur jembatan. Untuk merencanakan jembatan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen. Besar nilai BGT dari beban lajur “D” dan beban roda dari beban truk “T”, harus cukup untuk memberikan interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan yang dikalikan dengan FBD.

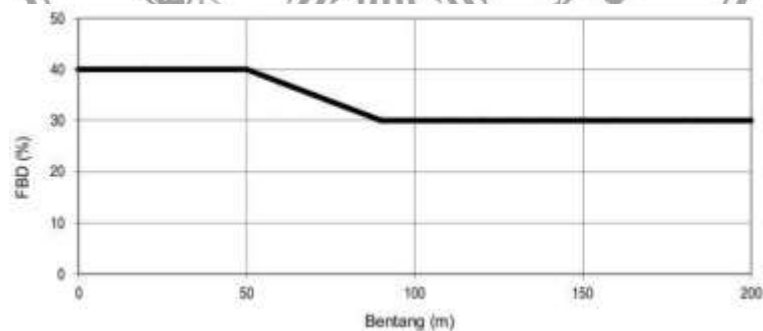
Untuk beban lajur “D” pada FDB merupakan fungsi panjang bentang ekuivalen. Untuk bentang tunggal panjang bentang ekuivalen, diambil nilai yang sama dengan panjang bentang sebenarnya. Bentang panjang menerus bentang ekuivalen L_E ditentukan dalam persamaan 2.12 berikut.

$$L_E = \sqrt{L_{av}L_{max}} \quad (2.12)$$

Dimana:

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

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



Gambar 2. 12 Faktor Beban Dinamis untuk Beban Lajur "D"
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

Sedangkan untuk pembebanan truk “T”, nilai FDB diambil sebesar 30%. Nilai yang dihitung digunakan pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah.

2.6.2.4 Gaya Rem (TB)

Menurut SNI 1725:2016, gaya rem harus ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati sesuai dengan lalu lintas di arah yang sama. Gaya rem harus diasumsikan bekerja secara horizontal dengan jarak 1800 mm di atas permukaan lantai kendaraan pada masing-masing arah longitudinal, dan dipilih nilai yang paling menentukan. Untuk jembatan yang direncanakan satu arah, maka semua lajur rencana harus dibebani secara simuitan saat menghitung besarnya gaya rem yang terjadi pada lantai kendaraan. Gaya rem tidak boleh bekerja bersamaan dengan beban dinamis, sehingga nilai yang diambil harus terbesar seperti berikut.

- a. 25% dari berat gandar truk dasain, atau
- b. 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR)

2.6.2.5 Gaya Sentrifugal (TR)

Gaya sentrifuga bertujuan untuk menghitung gaya radial atau efek guling dari beban roda. Pengaruh gaya sentrifugal pada beban hidup harus diambil sebagai hasil kali dari berat gandar truk rencana dan faktor C seperti berikut.

$$C = f \frac{v^2}{gR_1} \quad (2.13)$$

Dimana:

v : kecepatan rencana jalan raya (m/detik)

f : faktor dengan nilai 4/3 untuk kombinasi beban selain keadaan batas fatik, dan 1,0 untuk keadaan batas fatik

g : percepatan gravitasi (9,8 m/detik²)

R_1 : jari-jari kelengkungan lajur lalu lintas (m)

Gaya setrifugal harus diberlakukan secara horisontaal pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Maka, perencana harus menyediakan mekanisme untuk meneruskan gaya sentrifugal dari permukaan jembatan menuju struktur bawah jembatan. Pengaruh dari superelevasi yang mengurangi momen guling akibat gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh beban roda, dapat dipertimbangkan dalam perencanaan jembatan.

2.6.2.6 Beban Akibat Tumbukan Kendaraan (TC)

Fungsi dari komponen railing pada jembatan adalah memberikan faktor keamanan bagi seluruh pengguna jembatan. Semua sistem yang ada pada lalu lintas, railing, serta railing kombinasi secara geometrik dan struktur harus tahan terhadap benturan. Untuk menentukan mekanisme beban pada railing dipilih berdasarkan kinerja jembatan tersebut, diantaranya:

a. Kinerja 1

Digunakan untuk jalan dengan kecepatan rencana rendah dan volume kendaraan yang sangat rendah, jalan lokal dengan kecepatan rendah.

b. Kinerja 2

Digunakan untuk jalan lokal dan kolektor dengan kondisi baik, seperti jumlah kendaraan berat sedikit dan rambu kecepatan sedikit.

c. Kinerja 3

Digunakan pada jalan arteri dengan kecepatan rencana tinggi, serta 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 (campuran truk dan kendaraan berat lainnya).

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 beban rencana akibat tumbukan kendaraan pada railing jembatan disajikan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Kriteria Kinerja Railing dan Kinerja 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 (θ)	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: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.6.3 Beban Aksi Lingkungan

Beban aksi lingkungan meliputi pengaruh temperatur, angin, najir, gempa, dan penyebab-penyebab alamiah lainnya. Berdasarkan SNI 1725:2016, beban rencana yang diberikan pada jembatan dihitung berdasarkan analisa statistik dari kejadian-kejadian umum yang tercatat tanpa memperhitungkan hal khusus yang akan memperbesar pengaruh setempat.

2.6.3.1 Beban Angin

Tekanan angin pada jembatan harus direncanakan sesuai dengan kecepatan angin dasar (V_b) yaitu 90 – 126 km/jam. Beban angin harus diasumsikan dapat terdistribusi merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Luas are yang diperhitungkan yaitu luas area seluruh komponen termasuk sistem lantai dan railing. Namun, luasan yang tidak memberi kontribusi dapat diabaikan dalam perencanaan jembatan tersebut.

Untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 10000 mm di atas permukaan tanah atau air, kecepatan angin rencana, maka V_{DZ} harus dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_{DZ} = 2,5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (2.14)$$

Dimana:

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

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

V_B : kecepatan angin rencana yaitu 90 – 126 km/jam pada elevasi 1000 mm

Z : elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari permukaan air dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm)

V_0 : kecepatan gesekan angin yang merupakan karakteristik meteorologi, sebagaimana ditentukan pada Tabel 2.9 untuk berbagai macam tipe permukaan di hulu jembatan (km/jam)

Z_0 : panjang gesekan di hulu jembatan yang merupakan karakteristik meteorologi

Nilai V_{10} diperoleh dari:

- Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang
- Survei angin pada lokasi jembatan
- Jika tidak ada data yang lebih baik, perencana dapat mengasumsikan

$$V_{10} = V_B = 90 - 126 \text{ km/jam}$$

Tabel 2. 9 Nilai V_0 dan Z_0 untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
V_0 (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Z_0 (mm)	70	1000	2500

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

Untuk menentukan nilai tekanan angin rencana (MPa) dapat ditetapkan dengan persamaan berikut.

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \quad (2.15)$$

Dimana:

P_B : tekanan angin dasar seperti pada Tabel 2.10

Tabel 2. 10 Tekanan Angin Dasar

Komponen Bangunan Atas	Angin Tekan (MPa)	Angin Hisap (MPa)
Rangka, kolom, dan pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan datar	0,0019	N/A

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

Adapun gaya total angin tidak boleh diambil kurang dari 4,4 kN/mm pada bidang tekan, 2,2 kN/mm pada bidang hisap struktur rangka dan pelengkung, serta tidak kurang dari 4,4 kN/mm pada balok/gelagar. Beban angin pada struktur kendaraan juga harus diperhitungkan sebagai gaya yang akan mempengaruhi struktur jembatan. Dimana tekanan tersebut diasumsikan sebagai tekanan menerus (1,46 N/mm), tegak lurus dan bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan. Berikut sudut serang pada kendaraan disajikan pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 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	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

Apabila jembatan dengan rasio panjang bentang terhadap lebar jembatan lebih besar dari 30, maka dianggap sebagai jembatan yang rentan terhadap pengaruh aerolastik angin. Sehingga jembatan harus mampu menahan beban garis memanjang jembatan yang mempresentasikan gaya angin vertikal ke atas sebesar $9,6 \times 10^{-4}$ MPa dikalikan lebar jembatan, termasuk parapet dan trotoar. Namun, gaya ini harus ditinjau hanya untuk keadaan Batas Kuat III dan Layan IV yang tidak memperhitungkan angin pada kendaraan, dan hanya ditinjau pada kasus pembebanan dimana arah angin dianggap bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang jembatan. Gaya memanjang tersebut memiliki titik tangkap pada seperempat lebar jembatan dan bekerja secara bersamaan dengan angin horizontal.

2.6.4 Beban Aksi Lainnya

Beban aksi lainnya merupakan pembebanan yang bersifat sementara/*temporary* seperti halnya saat dilakukan proses konstruksi dari jembatan berdasarkan metode kerja yang sudah dibuat dan disetujui oleh pihak berwenang.

2.6.4.1 Beban Pelaksanaan

Beban pelaksanaan pada jembatan terbagi menjadi dua, yaitu:

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

Urutan metode pelaksanaan pada perencanaan jembatan harus benar-benar diperhitungkan dengan baik berdasarkan permasalahan yang pernah ada saat pelaksanaan pembangunan jembatan. Metode perencanaan untuk pelaksanaan pembangunan harus menentukan tingkat kemungkinan kejadian dan menggunakan faktor beban sesuai aksi lingkungan yang bersangkutan.

2.6.5 Beban Kombinasi

Faktor kombinasi pembebanan pada struktur jembatan harus benar-benar diperhatikan agar memperoleh hasil aksi yang sesuai dan paling berpengaruh dari struktur jembatan itu sendiri. Berdasarkan SNI 1725:2016, berikut faktor kombinasi pembebanan yang dapat digunakan untuk perencanaan jembatan disajikan pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Faktor Kombinasi Pembebanan pada Jembatan

Keadaan Batas	<i>MS</i> <i>MA</i> <i>TA</i> <i>PR</i> <i>PL</i> <i>SH</i>	<i>TT</i> <i>TD</i> <i>TB</i> <i>TR</i> <i>TP</i>	<i>EU</i>	<i>EWs</i>	<i>EWL</i>	<i>BF</i>	<i>EUn</i>	<i>TG</i>	<i>ES</i>	Gunakan Salah Satu		
										<i>EQ</i>	<i>TC</i>	<i>TV</i>
Kuat I	γ_p	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_p	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_p	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_p	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_p	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γ_p	γ_{EQ}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00	-	-
Ekstrem II	γ_p	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,00	1,00
Daya layan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya layan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya layan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya layan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Fatig (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Catatan:	γ_p dapat berupa γ_{MS} , γ_{MA} , γ_{TA} , γ_{PR} , γ_{PL} , γ_{SH} , tergantung beban yang ditinjau γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa											

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016)

2.7 Batang Tarik (*Tension Member*)

Batang tarik merupakan struktur yang memikul/ mentransfer gaya tarik antara dua titik pada struktur. Batang tarik banyak dijumpai pada material baja yang sangat efektif dalam menerima beban. Pada batang ini dapat terdiri dari profil tunggal maupun ganda.

Berdasarkan SNI 1729:2020, batang tarik terbagi menjadi dua, yaitu kuat tarik nominal penampang bruto (*gross section yielding*) dan kuat tarik nominal penampang efektif (*net section fracture*) di mana pada perencanaan diambil nilai yang terkecil. Untuk menentukan nilai kuat tarik, dapat mengikuti persamaan berikut.

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

$$\phi P_n = \phi A_g \cdot f_y \quad (2.16)$$

Dimana:

f_y : tegangan leleh yang material (MPa)

A_g : luas penampang kotor (mm^2)

ϕ : faktor tahanan kondisi leleh baja, diambil nilai sebesar 0,90

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

$$\phi P_n = \phi F_u \cdot A_e \quad (2.17)$$

Dimana:

F_u : kuat tarik minimum terspesifikasi (MPa)

A_e : luas netto efektif (mm^2)

ϕ : faktor tahanan kondisi leleh baja, diambil nilai sebesar 0,75

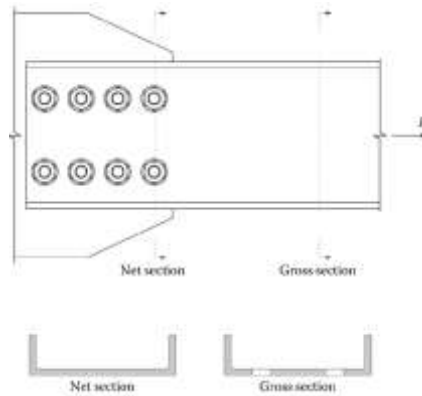
Untuk menentukaan nilai luas netto efektif (A_e), ditentukan pada persamaan berikut.

$$A_e = A_n \cdot U \quad (2.18)$$

Dimana:

A_n : luas netto (mm^2)

U : faktor *lag geser/shear lag*



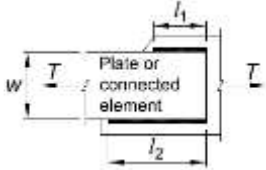
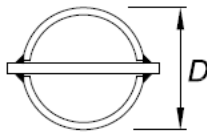
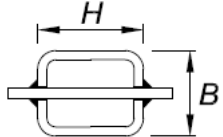
Gambar 2. 13 Gambaran Tinjauan Kapasitas Tarik pada Penampang Bruto dan Penampang Netto (Sumber: Chen & Duan, 2013)

2.7.1 Faktor Shear Lag

Faktor *shear lag* (U) pada perencanaan batang tarik berfungsi untuk mengantisipasi terjadinya kesalahan atau tidak sempurnaan saat proses penyambungan material baja, sehingga distribusi tegangan yang tidak merata dan beberapa terjadi konstrasi tegangan terpusat. Hal ini tentu akan mengurangi kinerja pada batang tarik. Untuk menentukan besar kecilnya *shear lag*, yaitu tergantung pada bentuk sambungan yang digunakan. Pada perencanaan sambungan struktur tentunya harus mempertimbangkan kemudahan dalam pelaksanaan di lapangan dan segi biaya pembuat sambungan tersebut. Berikut nilai faktor *shear lag* (U) pada batang tarik berdasarkan bentuk penampang material yang digunakan menurut SNI 1729:2020 yang disajikan dalam Tabel 2.13.

Tabel 2. 13 Faktor *Shear Lag* (U) Batang Tarik

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor Lag Geser (U)	Contoh
1	Semua komponen struktur tarik dengan beban tarik disalurkan secara langsung ke setiap dari elemen profil melintang melalui pengencang atau las (kecuali seperti dalam kasus 4, 5, dan 6)	$U = 1,0$	-
2	Semua komponen struktur tarik, kecuali PSR dengan beban tarik disalurkan ke beberapa tetapi tidak semua elemen profil melintang melalui pengencang atau las longitudinal dalam kombinasi dengan las transversal. Secara alternatif, kasus 7 dapat diizinkan untuk profil W, M, dan HP. (untuk	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$	

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor Lag Geser (U)	Contoh
	baja siku, kasus 8 diizinkan untuk dipergunakan)		
3	Semua komponen struktur tarik dengan beban tarik hanya disalurkan melalui las transversal ke beberapa tetapi tidak semua elemen profil melintang	$U = 1,0$ $A_n =$ luas elemen yang disambung langsung	-
4 ^[a]	Pelat, siku, kanal dengan pengelasan pada <i>heels</i> , <i>T</i> dan profil W yang elemen-elemennya disambung, dengan beban tarik disalurkan hanya melalui las longitudinal. Lihat Kasus 2 untuk definisi dari \bar{x}	$U = \frac{3l^2}{3l^2 + w^2} \times (1 - \frac{\bar{x}}{l})$	
5	PSR Bundar dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal melalui <i>slot</i> pada PSR	$l \geq 1,3D, U = 1,0$ $D \leq l < 1,3D,$ $U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
6	PSR persegi panjang dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal dengan dua sisi pelat buhul	$l \geq H, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$	
7	Profil W, M, S atau HP atau T yang dipotong dari profil-profil ini (Jika U dihitung dalam Kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	dengan sayap disambungkan dengan tiga atau lebih pengencang per baris dalam arah pembebanan $b_t \geq \frac{2}{3}d, U = 0,90$ $b_t < \frac{2}{3}d, U = 0,85$ dengan badan disambungkan dengan empat atau lebih pengencang perbaris dalam arah pembebanan $U = 0,70$	-
8	Siku tunggal dan ganda (Jika U dihitung dalam Kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	dengan empat atau lebih pengencang per baris dalam arah pembebanan $U = 0,80$ dengan tiga pengencang per baris dalam arah pembebanan (dengan lebih sedikit dari tiga pengencang per baris dalam arah pembebanan, $U = 0,60$	-

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor Lag Geser (U)	Contoh
	gunakan Kasus 2).		
<p>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).</p>			
(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)			

2.7.2 Batas Rasio Kelangsingan Batang Tarik

Material baja mutu tinggi akan mengakibatkan dimensi pada batang bisa sangat langsing. Secara teori, batas rasio kelangsingan pada batang hanya dapat digunakan pada batang tekan, karena kelangsingan dikhususkan untuk batang yang mengalami tekuk. Menurut AASHTO 2017, disarankan untuk tetap menggunakan rasio kelangsingan karena apabila terjadi getar dan goyangan pada struktur langsing akan mengakibatkan ketidaknyamanan saat proses perawatan/*service*. Berikut syarat untuk batas rasio kelangsingan yang harus dipenuhi.

- a. Untuk batang primer/utama

$$\frac{L}{r} \leq 300 \quad (2.19)$$

Dimana:

L : panjang batang (mm)

r : jari-jari girasi penampang (mm)

- b. Untuk batang sekunder

$$\frac{L}{r} \leq 240 \quad (2.20)$$

Dimana:

L : panjang batang (mm)

r : jari-jari girasi penampang (mm)

Batas rasio kelangsingan di atas, tidak berlaku pada elemen *hanger* yang merupakan material *solid strand/rod*, karena material tersebut didesain hanya untuk menahan gaya tarik. Penggunaan elemen struktur *hanger* akan meningkatkan kekakuan sesuai beban yang bekerja dan dapat mempertahankan geometrinya. Rasio kelangsingan pada elemen struktur *hanger* juga memiliki syarat tersendiri dari produk material yang akan digunakan dalam perencanaan struktur tersebut.

2.8 Batang Tekan (*Compression Member*)

Batang tekan adalah elemen struktur yang hanya menerima aksial gaya tekan saja, dimana gaya bekerja pada arah longitudinal sumbu bahan. Komponen struktur yang dibebani secara konsentris dimana seluruh serat bahan masih dalam kondisi elastik hingga terjadi tekuk, perlahan akan melengkung seperti Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2. 14 Batang Tekan Mengalami Tekuk
(Sumber: Setiawan, 2008)

Pada struktur jembatan, batang tekan ditujukan untuk komponen struktur yang menerima beban tekan sentris tepat pada titik berat penampang batang tersebut (ujung-ujung). Saat metode pelaksanaan di lapangan agar bisa membuat presisi sambungan tentunya tidak mudah, hal ini dapat menimbulkan eksentrisitas pada batang dan terjadi momen. Eksentrisitas pada struktur batang memiliki nilai yang relatif kecil, sehingga dapat diabaikan dan prosedur desain dapat digunakan.

Pada pelaksanaan struktur baja, penentuan nilai kapasitas batang tekan tentu berbeda dengan kapasitas batang tarik. Pada kapasitas batang tarik menggunakan F_u dan F_y , sedangkan pada batang tekan menggunakan F_y saja karena F_u tidak pernah mencapai ketentuan yang disyaratkan. Penentuan nilai kapasitas batang tekan juga dipengaruhi oleh beberapa aspek, yaitu geometri pada potongan batang tekan dan panjang dari batang tersebut. Maka, kapasitas batang tekan harus mempertimbangkan kelangsingan untuk mencegah terjadinya tekuk lokal dan tekuk global.

2.8.1 Batas Rasio Kelangsingan Batang Tekan

Rencana rasio kelangsingan pada batang tekan menjadi parameter yang sangat penting, serta dapat menjadi batasan kinerja atas perilaku batang tekan. Pada perencanaan batang tekan, hal yang menjadi penentu adalah penampang luar, pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}), dan panjang batang

yang ditumpu dengan panjang efektif dan kondisi tumpuan (KL) tersebut. Berikut rasio kelangsingan penampang pada batang tekan menurut SNI 1729:2020.

a. Untuk batang primer/utama

$$\frac{KL}{r} \leq 200 \quad (2.21)$$

dimana:

K : faktor panjang efektif batang

L : panjang batang (mm)

r : jari-jari girasi penampang (mm)

b. Untuk batang sekunder



$$\frac{KL}{r} \leq 140 \quad (2.22)$$

dimana:

K : faktor panjang efektif batang

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 K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Design value of K when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.0	1.2	2.1	2.0
End condition code		Rotation fixed Translation fixed		Rotation free Translation fixed		Rotation fixed Translation free
		Rotation free Translation fixed		Rotation fixed Translation free		Rotation free Translation free

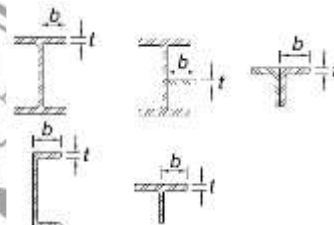
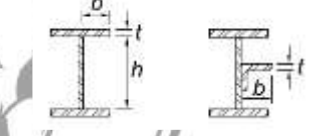
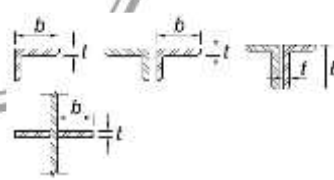
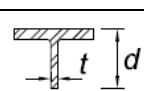
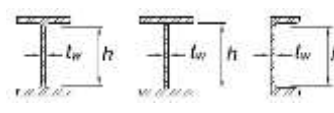
Gambar 2. 15 Faktor Panjang Efektif pada Batang Tekan
(Sumber: Aashto, 2017)

2.8.2 Kelangsingan Penampang Batang Tekan

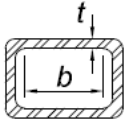
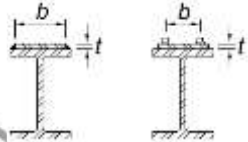
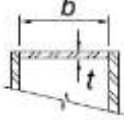
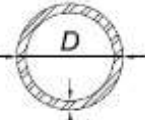
Pada batang tekan, perilaku tekun dibagi menjadi dua yaitu tekuk lokal dan tekuk global. Kedua perilaku tersebut harus dihindari dalam perencanaan batang tekan agar struktur yang direncanakan bisa optimal. Berdasarkan SNI 1729:2020, batang tekan terdiri dari penampang kompak (*compact*), penampang tidak kompak

(*non compact*), dan penampang langsing (*slender*). Hal tersebut dapat diketahui berdasarkan rasio lebar dan tebal (b/t) dari bentuk material yang digunakan. Berikut batasan rasio penampang pada batang tekan disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 14 Rasio Tebal Terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Gaya Aksial Tekan

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar Terhadap Tebal	Batas Rasio	Contoh
			Lebar Terhadap Tebal λ_r (nonlangsing/langsing)	
Elemen Tidak Diperkaku	1 Sayap Profil I gilas panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I gilas panas, kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap kanal, dan sayap T	b/t	$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2 Sayap profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	b/t	$0,64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$	
	3 Kaki siku tunggal, kaki siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tidak diperkaku lainnya	b/t	$0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Badan T	d/t	$0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Elemen Diperkaku	5 Badan profil I simetris ganda dan penampang profil I tersusun dan kanal	h/t_w	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [a]	

Tabel 2. 14 Rasio Tebal Terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Gaya Aksial Tekan

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar Terhadap Tebal	Batas Rasio	Contoh
			Lebar Terhadap Tebal λ_r (nonlangsing/ langsing)	
6	Dinding PSR persegi panjang	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Elemen Diperkaku	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara baris-baris pengencang atau las	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	Semua elemen diperkaku lainnya	b/t	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	PSR bulat	b/t	$0,11 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

[a] $kc = 4\sqrt{h/t_w}$, tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,35 atau lebih besar dari 0,76 dalam perhitungan

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

2.8.3 Kuat Tekan Nominal Penampang (*Compressive Resistance*)

Dalam merencanakan elemen batang tekan, tergantung dari profil yang ditinjau berdasarkan klasifikasi penampang, yaitu penampang kompak dan tidak kompak. Perilaku dari penampang dibagi menjadi 3, yaitu tekuk lentur (*flexural buckling*), tekuk torsi (*torsional buckling*), dan tekuk-torsi (*flexural-torsional buckling*). Berikut persamaan untuk menentukan nilai kapasitas batang tekan berdasarkan SNI 1729:2020.

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} \cdot A_g \quad (2.23)$$

Dimana:

P_n : kekuatan tekan nominal (N)

ϕ_c : faktor tahanan untuk kondisi tekan (dipakai 0,95)

A_g : luas penampang melintang bruto komponen struktur (mm^2)

F_{cr} : tegangan kritis (MPa)

Secara umum, nilai P_n ditentukan berdasarkan:

a. Jika $\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$, maka:

$$F_{cr} = (0,658 \frac{F_y}{F_e}) F_y \quad (2.24)$$

b. Jika $\frac{L_c}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} > 2,25$, maka:

$$F_{cr} = 0,877 F_y \quad (2.25)$$

Dimana:

E : modulus elastisitas baja (200.000 MPa)

F_e : tegangan tekuk elastis (N)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(\frac{KL}{r})^2} \quad (2.26)$$

Dimana:

K : faktor panjang efektif batang

L : panjang batang (mm)

r_s : jari-jari girasi penampang (mm)

Penggunaan rumus di atas, memberikan karakteristik terhadap perilaku tekuk yang ditinjau yaitu tekuk inelastis (persamaan 2.24) dan tekuk plastis (persamaan 2.25).

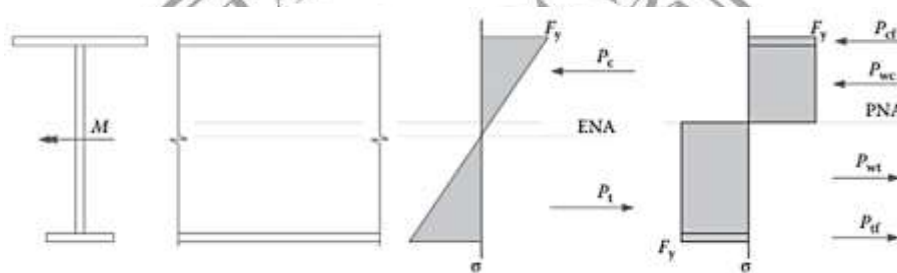
2.9 Batang Lentur (*Flexural Member*)

Batang lentur memiliki karakteristik yang memikul beban tegak lurus dari batang yang diletakkan secara horizontal. Dari perletakan beban tersebut, terjadilah perilaku lentur yang dominan dan dihasilkan dua jenis gaya yaitu tarik di bawah garis gaya, serta tekan di atas garis gaya. Pada balok material baja yang bersifat daktail, maka apabila balok diberi beban akan menyebabkan kondisi geometrinya berubah. Namun, jika beban pada balok dilepas kembali, kondisi geometri balok akan kembali seperti semula. Kondisi tersebut dinamakan kondisi elastis.

Untuk kondisi plastis pada balok, terjadi apabila balok diberi beban hingga mencapai kondisi plastis. Hal tersebut akan mengakibatkan deformasi permanen. Sehingga balok tadi tidak bisa kembali ke bentuk semula.

2.9.1 Klasifikasi Elemen Penampang

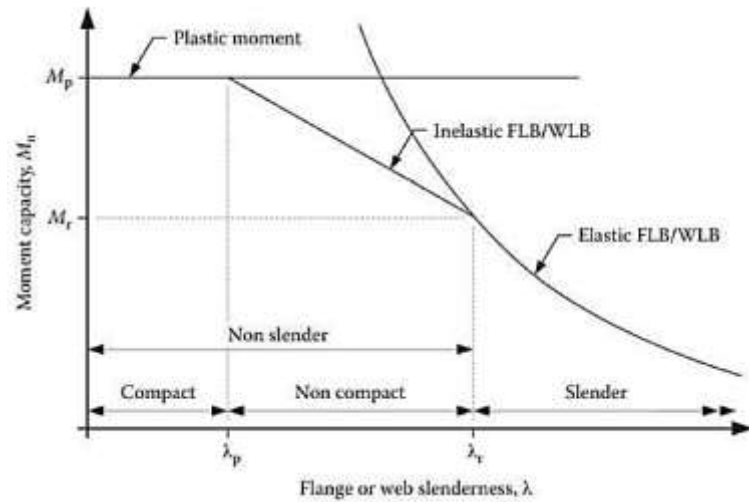
Tahapan awal untuk menentukan batang lentur yaitu dengan klasifikasi profil. Elemen penampang diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu penampang kompak, penampang non-kompak, dan penampang langsing. Klasifikasi tersebut berfungsi dalam menentukan ekonomis atau tidaknya suatu penampang terhadap gaya-gaya yang bekerja. Untuk penampang kompak, memiliki geometri penampang yang efisien karena mampu mencapai momen plastis. Sehingga profil pada penampang kompak dapat dikatakan ekonomis.



Gambar 2. 16 Kondisi Leleh dan Plastis pada Penampang
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

Pada penampang non-kompak, yaitu memiliki tingkat efisien lebih kecil dibanding profil kompak. Hal ini dikarenakan beban yang akan mencapai tegangan leleh akan mengakibatkan penampang mengalami tekuk lokal lebih dahulu sebelum penampang plastis terbentuk. Sehingga, kapasitas momen penampang yang terjadi yaitu $M_y < M_p$.

Sedangkan untuk penampang langsing merupakan profil penampang yang paling tidak efisien diantara ketiga klasifikasi elemen penampang, terlebih dari segi penggunaan material. Profil penampang langsing sebelum mencapai kondisi leleh, akan terjadi tekuk lebih dulu pada penampang tersebut. Sehingga kapasitas momen penampang yang terjadi yaitu $M < M_y$. Berikut perilaku ketiga elemen penampang yang digambarkan pada grafik Gambar 2.17 terhadap kapasitas batang lentur.



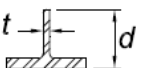
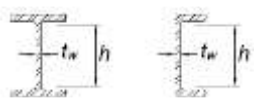
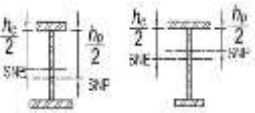
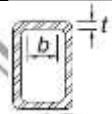
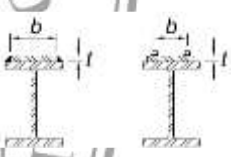

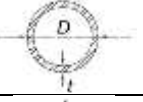

Gambar 2. 17 Perilaku Kapasitas Penampang terhadap Klasifikasi Penampang (Sumber: Chen & Duan, 2013)

Adapun rasio tebal profil penampang yang disajikan dalam Tabel 2.15 berikut.

Tabel 2. 15 Rasio Tebal terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Ketebalan Terhadap Lebar	Batasan Rasio Lebar Terhadap Tebal		Contoh
			λ_p (Kompak/Non-Kompak)	λ_r (Non-kompak/Langsing)	
Elemen Tidak Diperkaku	1 Sayap profil I gilas panas, kanal, dan T	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2 Sayap profil tersusun bentuk I simetris ganda dan tunggal	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,95 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	3 Kaki siku tunggal	b/t	$0,54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4 Sayap semua profil I dan kanal yang mengalami lentur terhadap sumbu lemah	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Tabel 2. 15 Rasio Tebal terhadap Lebar: Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Kasus	Deskripsi Elemen	Rasio Ketebalan Terhadap Lebar	Batasan Rasio Lebar Terhadap Tebal		Contoh
			λ_p (Kompak/Non-Kompak)	λ_r (Non-kompak/Langsing)	
5	Badan T	b/t	$0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
6	Badan 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 profil I simetris tunggal	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $(0,54 \frac{M_p}{M_y} - 0,09)^2$ $\leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$	
8	Sayap PSR persegi panjang	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
9	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara baris-baris pengencang atau las	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
10	Persegi panjang dan boks	h/t	$2,42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
11	PSR bundar	D/t	$0,07 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0,31 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
12	Sayap penampang boks	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

2.9.2 Kekuatan Nominal Penampang

Umumnya, kekuatan nominal penampang ditentukan oleh klasifikasi dari penampang tersebut. Untuk menentukan kapasitas batang lentur (*flexural member*), secara umum menggunakan persamaan berikut.

$$M_u = \phi_f M_n \quad (2.27)$$

Dimana:

M_u : kuat lentur perlu (*momen ultimate*) yang terjadi pada penampang/profil

ϕ_f : faktor tahanan lentur (dipakai 0,90)

M_n : kuat lentur nominal penampang yang ditinjau berdasarkan bentuk geometri penampang

Penampang yang mengalami torsi harus ditambahkan pengaku lateral dengan jarak minimum dan maksimum berdasarkan ketentuan SNI 1729:2020. Maka, sebelum menentukan nilai kapasitas lentur terhadap tekuk lateral, diperhitungkan terlebih dahulu batasan-batasan yang berlaku untuk pengaku lateral tersebut. Umumnya, dapat mengikuti persamaan berikut.

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.28)$$

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0}\right)^2 + 6,76\left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.29)$$

Dimana:

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 : jari-jari girasi penampang pada sumbu lemah

E : modulus elastis baja (200.000 MPa)

F_y : kuat leleh minimum (MPa)

$r_{ts} : \sqrt{\frac{I_y C_w}{S_x}}$

J : konstanta torsi (mm⁴)

h_0 : jarak antar titik berat elemen sayap (mm)

C : untuk profil I simetris ganda ($c = 1$)

Untuk mengecek kontrol penampang lentur terhadap profil I, sudah diatur dalam SNI 1729:2020 yang menjelaskan terkait geometri penampang yang akan digunakan.

2.10 Kuat Geser Nominal (*Shear Nominal*)

Pada komponen balok memiliki elemen badan (*web*) dan sayap (*flages*) yang harus didesain untuk perilaku lentur. Terutama pada bagian sayap yang memiliki peran penting terhadap perilaku lentur. Sedangkan pada bagian badan (*web*) berfungsi menahan gaya geser yang terjadi. Sehingga, balok atau batang harus dievaluasi terhadap gaya geser yang terjadi pada penampang. Umumnya, kuat geser terhadap penampang harus memenuhi persamaan berikut.

$$V_u = \phi_v V_n \quad (2.30)$$

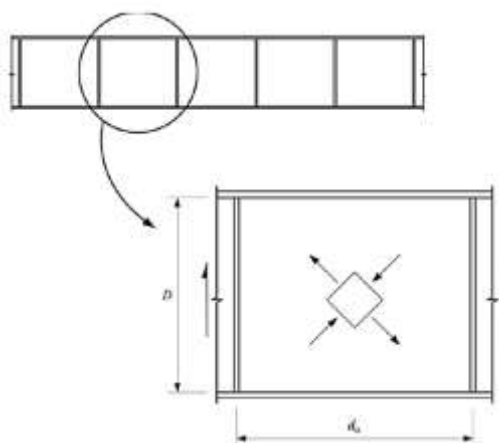
Dimana:

V_u : gaya geser yang terjadi pada penampang

ϕ_v : faktor tahanan geser (dipakai 0,90)

V_n : kuat geser nominal balok berdasar kondisi (a dan b)

Terdapat dua jenis perilaku geser yang bisa terjadi pada suatu penampang, yaitu komponrn struktur dengan badan yang tidak diperkaku dan kondisi aksi menda tarik (*tension field action*). Untuk kondisi aksi medan tarik, perlu diperhatikan ketika terjadi tekuk pelat pada badan (*web*) dengan pengaku tegak saat diberi beban. Di waktu tersebut, terjadi aksi saling tarik dan tekan pada pelar yang diperkaku. Peristiwa tersebut biasanya berlaku pada penampang dengan badan (*web*) langsing.



Gambar 2. 18 Pengalihan Gaya Geser Akibat Beban yang Bekerja
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

2.10.1 Kuat Geser Nominal Badan Tanpa Perilaku (*Tension Field Action*)

Kuat geser nominal yang terjadi pada suatu penampang (V_n) dari badan (*web*) yang diperkaku atau tidak diperkaku dari perlelehan geser dan tekuk geser harus memenuhi persamaan berikut berdasarkan SNI 1729:2020.

$$V_u = 0,6F_y A_w C_{v1} \quad (2.31)$$

Dimana:

F_y : mutu baja (MPa)

A_w : luas total pelat badan (d_{tw}) (mm²)

Adapun nilai koefisien geser dari pelat badan (*web*), (C_v) yang merupakan faktor reduksi sebagai antisipasi jika terjadi tekuk. Berikut jenis koefisien geser berdasarkan SNI 1729:2020:

- a. Pelat badan profil I-*Hot Rolled*, jika:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 \left(\frac{E}{F_y} \right) \quad (2.32)$$

Maka, nilai $C_{v1} = 1,00$

- b. Untuk profil yang tidak memenuhi syarat di atas, tetapi merupakan profil I simetri ganda atau tunggal, maka C_{v1} ditentukan seperti berikut.

$$1. \text{ Jika, } \frac{h}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad (2.33)$$

maka kuat geser nominal tidak dipengaruhi tekuk pada badan (*web*), sehingga $C_{v1} = 1,00$.

$$2. \text{ Jika, } \frac{h}{t_w} > 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad (2.34)$$

maka kuat geser nominal tidak dipengaruhi tekuk pada badan (*web*), sehingga:

$$C_{v1} = \frac{1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}} \quad (2.35)$$

Adapun nilai koefisien tekuk pada pelat (k_v) untuk profil I dijelaskan sebagai berikut:

- a. Untuk badan (*web*) tanpa pengaku, maka:

$$k_v = 5,34 \quad (2.36)$$

- b. Untuk badan (*web*) dengan pengaku, maka:

$$k_v = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \quad (2.37)$$

$$= 5,43, \text{ jika } a/h > 3$$

2.10.2 Kuat Geser Nominal Pada Kondisi Tension Field Action

Berdasarkan SNI 1729:2020, ketentuan ini berlaku jika ada pengaku yang berbentuk bingkai pada pelar badan (*web*) di arah horizontal. Adanya kondisi seperti ini dapat diterapkan jika $a/h > 3$. Maka, kuat geser nominal yang berlaku harus memenuhi persamaan berikut.

- a. Jika, $\frac{h}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$, maka:

$$V_n = 0,6 F_y A_w \quad (2.38)$$

- b. Jika, $\frac{h}{t_w} > 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$, maka:

$$V_n = 0,6 F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1,15 \left[\frac{a}{h} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2} \right]} \right] \quad (2.39)$$

Adapun nilai koefisien geser pada pelat badan (C_{v2}) yang merupakan faktor reduksi sebagai antisipasi jika terjadi tekuk yaitu sebagai berikut.

- a. Jika, $\frac{h}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$, maka:

$$C_{v2} = 1,00 \quad (2.40)$$

- b. Jika, $1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$, maka:

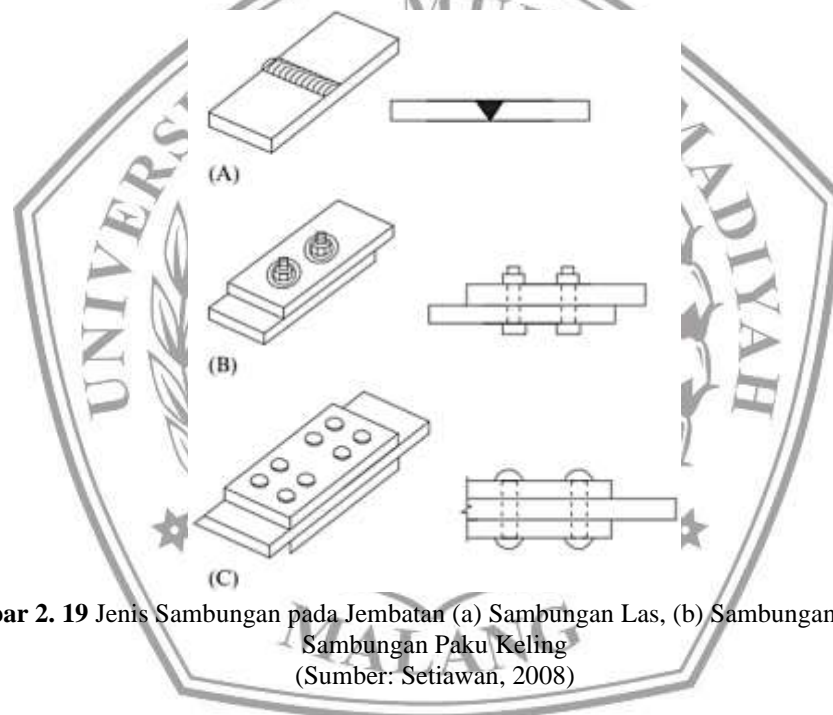
$$C_{v2} = \frac{1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}} \quad (2.41)$$

- c. Jika, $\frac{h}{t_w} \leq 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$, maka:

$$C_{v2} = \frac{1,51 k_v E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 F_y} \quad (2.42)$$

2.11 Sambungan (*Connection*)

Jembatan struktur baja merupakan komponen struktur yang terdiri atas beberapa elemen primer dan sekunder dan dihubungkan oleh sambungan. Sambungan berfungsi untuk menyalurkan gaya dalam yang terjadi akibat beban yang bekerja. Kemudian, beban tersebut disalurkan menuju tumpuan jembatan. Umumnya, sambungan harus memenuhi prinsip reabilitas, keamana, mudah dalam pelaksanaan fabrikasi, mudah dalam pemasangan struktur, dan ekonomis terhadap anggaran biaya. Struktur jembatan baja, memiliki beberapa jenis sambungan yang bisa digunakan, yaitu sambungan paku keling (*rivet connection*), sambungan baut (*bolt connection*), dan sambungan las (*welding connection*).



Gambar 2. 19 Jenis Sambungan pada Jembatan (a) Sambungan Las, (b) Sambungan Baut, (c) Sambungan Paku Keling
(Sumber: Setiawan, 2008)

2.11.1 Sambungan Baut

Setiap struktur baja merupakan gabungan dari beberapa komponen batang yang disatukan dengan alat pengencang. Salah satu alat pengencang selain las yaitu baut mutu tinggi. Dua tipe dasar baut mutu tinggi yang distandarkan oleh ASTM yaitu tipe A325 dan A490. Baut tersebut memiliki kepala berbentuk segi enam. Dalam pemasangannya, memerlukan gaya tarik awal yang cukup dari pengencangan awal. Gaya tersebut akan memberikan friksi sehingga cukup kuat untuk memikul beban yang bekerja.

2.11.1.1 Persyaratan Umum Sambungan Baut

Pada perencanaan sambungan baut, terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi berdasarkan SNI 1729:2020, yaitu:

1. Jarak/spasi antar baut
 - a. Jarak tepi minimum dan maksimum

Jarak tepi minimum baut berdasarkan peraturan SNI 1729:2020 disajikan pada Tabel 2.16 berikut.

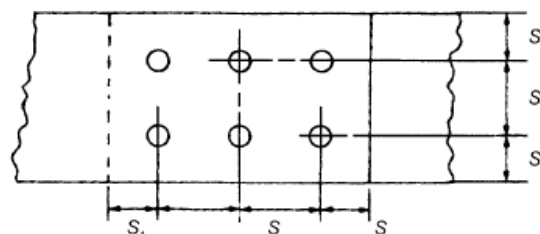
Tabel 2. 16 Syarat Jarak Tepi Minimum Baut

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: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

- b. Jarak antar baut

Jarak antar pusat lubang baut harus diambil tidak kurang dari 3 kali diameter nominal baut, dan jarak antara baut ke tepi dengan ujung pelat tidak boleh kurang dari syarat pada Tabel 2.16. Jarak maksimum antar pusat lubang baut tidak boleh melebihi 14 kali tebal pelat sambungan atau 180 mm, sedangkan jarak tepi maksimum harus tidak lebih dari 12 kali tebal plat penghubung atau 150 mm (SNI 1729: 2020).



Gambar 2. 20 Syarat Jarak Antar Baut
(Sumber: Setiawan, 2008)

2. Diameter lubang baut

Syarat lubang baut menurut AASHTO 2017, terbagi menjadi 4 jenis, yaitu standar, kebesarn (*oversize*), slot pendek (*short slot*), dan slot panjang (*long slot*). Berikut merupakan standar diameter lubang baut disajikan pada Tabel 2.17.

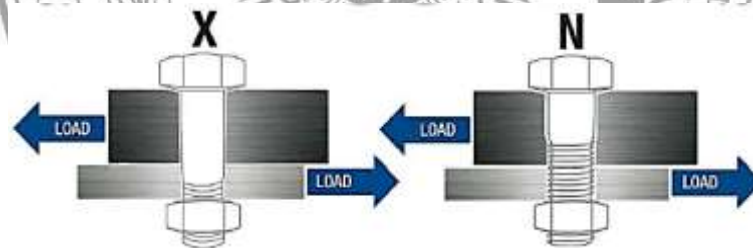
Tabel 2. 17 Standarisasi Diameter Lubang Baut

Diameter Baut (mm)	Standar (dia)	Oversize (dia)	Slot-pendek (b x h)	Slot-panjang (b x h)
M16	18	20	18 x 22	18 x 40
M20	22	24	22 x 26	22 x 50
M22	24	28	24 x 30	24 x 55
M24	27	30	27 x 32	27 x 60
M27	30	35	30 x 37	30 x 67
M30	33	38	33 x 40	33 x 75
≥M36	d+3	d+8	(d+3) x (d+10)	(d+3) x 2,1/2d

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

2.11.1.2 Sambungan Baut Tipe Geser

Untuk merencanakan sambungan baut tipe geser tergantung pada gaya geser yang bekerja terhadap penampang. Sambungan tipe ini juga tergantung pada bidang geser (*shear plane*) dari sambungan, dan tebal pelat sambung yang digunakan.



Gambar 2. 21 Ilustrasi Baut Berada pada Bidang Geser dan Di Luar Bidang Geser
(Sumber: allfastener.com)

Umumnya, kuat geser yang dihasilkan oleh sambungan dengan bagian ulir berada di luar bidang, maka kekuatannya sebesar $0,6A_bF_{ub}$. Namun, apabila ulir baut berada dalam bidang geser, kekuatan yang dihasilkan akan berkurang 20% (Chen, Duan, 2013). Maka, kuat geser baut pada perencanaan jembatan harus memenuhi persamaan berikut (AASHTO.2017):

- a. Untuk leleh geser elemen

$$\phi_s R_n = 0,6F_y A_{gv} \quad (2.43)$$

- b. Untuk runtuh geser elemen

$$\phi_s R_n = 0,6 F_u A_{nv} \quad (2.44)$$

Dimana:

ϕ_s : faktor tahanan sambungan tipe geser,
leleh geser dipakai 1,00
runtuh geser dipakai 0,75

A_b : luas penampang nominal baut (mm^2)

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

N_s : jumlah bidang geser per baut (n)

2.11.1.3 Sambungan Slip

Pada perencanaan jembatan, sebaiknya sambungan yang direncanakan tidak mengalami slip. Jika hal tersebut terjadi, akan menyebabkan sambungan yang bekerja adalah tahanan tumpu dari baut. Tentu hal tersebut harus dihindari demi keamanan para pengguna jembatan. Tahan slip dapat direncanakan dengan persamaan berikut.

$$\phi_s R_n = K_h K_s N_s P_t \quad (2.45)$$

Dimana:

N_s : jumlah bidang geser (jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kotak)

P_t : gaya tarik baut prategang minimum (MPa)

K_h : faktor kondisi lubang baut

K_s : faktor kondisi kekasaran permukaan sambungan

2.11.1.4 Kekuatan Tumpu Baut

Pengencangan saat pemasangan baut harus berdasarkan gaya pra tarik minimum yang disyaratkan oleh SNI 1729:2020. Namun, berdasarkan penjelasan slip kritis, jika terjadi kegagalan maka bagian tumpu baut harus ditinjau kembali pada perencanaan baut. Berikut persamaan tahanan tumpu dari lubang baut berdasarkan SNI 1729:2020.

1. Untuk baut tipe standar, *oversize*, slot pendek
 - a. Jika jarak antar lubang $< 2,0d$, dan jarak antar lubang ke tepi luar $< 2,0d$, maka:

$$\phi R_n = 2,4dtF_u \quad (2.46)$$

- b. Jika jarak antar lubang $> 2,0d$, dan jarak antar lubang ke tepi luar $> 2,0d$, maka:

$$\phi R_n = 1,2L_c t F_u \quad (2.47)$$

2. Untuk baut tipe slot panjang

- a. Jika jarak antar lubang $< 2,0d$, dan jarak antar lubang ke tepi luar $< 2,0d$, maka:

$$\phi R_n = 2,0dtF_u \quad (2.48)$$

- b. Jika jarak antar lubang $> 2,0d$, dan jarak antar lubang ke tepi luar $> 2,0d$, maka:

$$\phi R_n = L_c t F_u \quad (2.49)$$

Dimana:

d : diameter nominal baut (mm)

t : tebal pelat sambung (mm)

F_u : kuat tarik minimum pelat sambung yang ditinjau (MPa)

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

2.11.1.5 Sambungan Baut Tipe Tarik

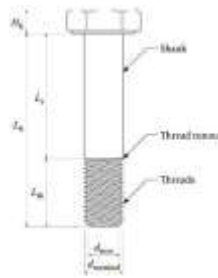
Sambungan tipe tarik merupakan jenis sambungan yang biasa digunakan pada elemen tambahan untuk antar member satu dengan yang lain. Penambahan elemen yang sering dilakukan adalah penambahan elemen *end plate* di ujung sambungan. Untuk sambungan tipe tarik ini menggunakan tahanan ulir baut dan mur, serta kuat tahanan dari kepala baut. Adapun persamaan untuk menentukan nilai kuat tarik (AASHTO,2017) sebagai berikut.

$$\phi T_n = 0,76A_b F_{ub} \quad (2.50)$$

Dimana:

A_b : luas penampang nominal baut (mm²)

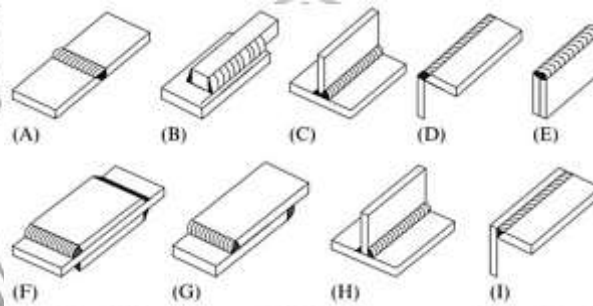
F_{ub} : kuat tarik minimum baut (MPa)



Gambar 2. 22 Parameter Baut
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

2.11.3 Sambungan Las (*Welding Connection*)

Pengelasan merupakan proses penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan suhu panas yang tinggi atau pemberian tekanan dan dengan tanpa bahan pengisi. Sambungan las juga merupakan jenis sambungan yang sering digunakan untuk perencanaan konstruksi jembatan. Beberapa jenis las yang sering digunakan yaitu las tumpul (*but welds*), las sudut (*fillet welds*), las plug, dan lainnya. Berikut gambar ilustrasi dari jenis-jenis sambungan las pada Gambar 2.23.



Gambar 2. 23 Jenis Sambungan Las, (a) Las Tumpul, (b) *Longitudinal Joint*, (c) *But Joint*, (d) *Corner Joint-1*, (e) *Edge Joint*, (f) *Transverse Fillet Joint*, (h) *Tee Joint*, (i) *Corner Joint-2*
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

Penggunaan sambungan las pada sambungan jembatan, akan lebih maksimal jika dikerjakan di ruang *workshop*/fabrikasi dibanding area lapangan. Hal tersebut dikarenakan mutu las pada sambungan lebih mudah terkontrol apabila dikerjakan di ruang *workshop*. Adapun penentuan kuat nominal untuk tipe las sudut yaitu dimana elektroda las dikalikan luasan *throat* las. Luasan tersebut adalah $0,07w$ (diambil dari kemiringan las sudut 45°). Berikut persamaan kuat nominal las sudut berdasarkan SNI 1729:2020.

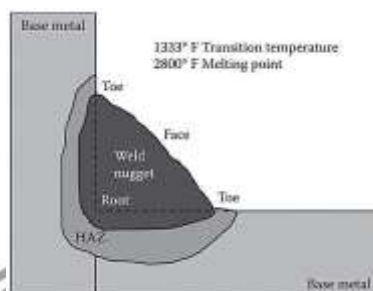
$$\phi R_n = 0,6F_{exx} \cdot 0,707aL \quad (2.51)$$

Dimana:

F_{exx} : mutu elektroda las (MPa)

a : tebal las rencana (mm)

L : panjang rencana las (mm)



Gambar 2. 24 Bentuk Penampang Las Sudut
(Sumber: Chen & Duan, 2013)

2.12 Hanger (Kabel Penggantung)

Hanger/kabel penggantung jembatan adalah bagian dari *tension structure* yang menggunakan strand kabel dimana merupakan produk industri sehingga mutu yang dimiliki sangat terjamin. Untuk kontrol terhadap penampang, mengacu pada sub bab 2.7 batang tarik. Adapun karakteristik yang dimiliki oleh batang penggantung (*hanger*) jembatan yaitu sebagai berikut:

- Memiliki penampang yang homogen pada seluruh batang
- Tidak terjadi momen dan gaya desak (murni tarik)
- Pada jembatan, batang tarik berperan sebagai penggantung rantai kendaraan dan beban titik
- Struktur kabel harus mampu mempertahankan bentuk geometrinya ketika diberi beban tarik

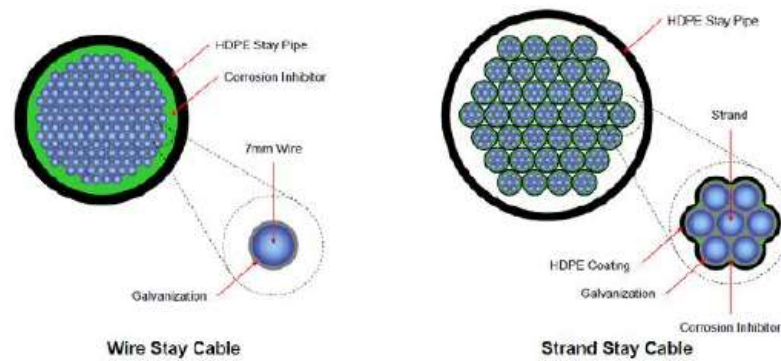
Adapun tipe kabel yang sering digunakan saat ini, yaitu:

- Parallel Wire Cables*

Kabel tipe ini terdiri dari kawat bulat galvanis (diameter 5 mm – 7 mm) berbentuk hexagonal dengan suatu helix panjang dan dilapisi oleh *High Density Polyethylene (HDPE) Tube*.

b. *Parallel Strand Cables*

Kabel tipe ini terdiri atas beberapa kawat strand yang dipasang secara paralel. Kabel ini juga terbentuk dari beberapa strand lain dengan besar 7, 19, 37, 61, 91, maupun 127 buah.



Gambar 2. 25 Tipe - tipe Kawat Kabel
(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015)

Untuk alat sambungan kabel dengan profil gelagar, pada Jembatan Enggang Gading ini direncanakan menggunakan tipe *open bridge socket* seperti Gambar 2.26 berikut.



Gambar 2. 26 Kabel Penggantung Produk Macaloy Tension Structure
(Sumber: Pfeifer Seilbau Cable Structure, 2015)

2.13 Pelat Lantai Kendaraan

Pelat lantai kendaraan merupakan elemen utama sebagai penyalur beban dari roda kendaraan menuju gelagar jembatan. Pelat lantai kendaraan juga berfungsi sebagai pengaku elemen gelagar melintang dan memanjang jembatan. Untuk perencanaan pelat lantai menggunakan struktur beton bertulang. sehingga perencanaan pelat lantai dapat mengacu pada pereturan SNI 2847:2013 dan RSNI T-12-2004.

2.13.1 Tebal Pelat Lantai Kendaraan

Berdasarkan RSNI T-12-2004, tebal minimum pelat lantai kendaraan (t_s) yaitu sebagai berikut:

$$t_s \geq 200 \text{ mm} \quad (2.52)$$

$$t_s \geq (100 + 40L) \text{ mm} \quad (2.53)$$

Dimana:

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

2.14 Ketentuan-Ketentuan Lain

Pada perencanaan jembatan, terdapat beberapa ketentuan lain yang juga harus diperhatikan. Adapun ketentuan-ketentuan tersebut yaitu lendutan, trotoar, tiang sandaran, dan lain sebagainya.

2.14.1 Lendutan

Lendutan pada perencanaan struktur jembatan harus diperhitungkan dengan baik pada seluruh komponen batang jembatan, baik balok maupun rangka. Berikut syarat lendutan yang diizinkan (AASHTO, 2017):

- $\frac{L}{800}$ untuk balok di atas dua tumpuan atau gelagar menerus
- $\frac{L}{1000}$ untuk jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki dengan intensitas pejalan kaki rendah
- $\frac{L}{1200}$ untuk jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki dengan intensitas yang signifikan
- $\frac{L}{300}$ untuk balok kantilever ujung pada jembatan

2.14.2 Perencanaan Camber

Camber merupakan ruang terbuka yang terdapat pada bawah jembatan yang memanfaatkan lengkungan lantai kendaraan jembatan. *Camber* biasa disebut dengan anti lendutan karena dibuat untuk melawan nilai lendutan yang melebihi nilai ijin akibat beban yang bekerja. Menurut (Cuomo & Mcdonald, 2014), adapun aturan terkait optimasi ketinggian camber terhadap bentang jembatan untuk menjaga keamanan dan kenyamanan dari pengguna jembatan seperti Tabel 2.18 berikut.

Tabel 2. 18 Optimasi Tinggi *Camber* Terhadap Panjang Bentang Jembatan

L maksimum (m)	H _{camber} maksimum (cm)
15	20
20	30
25	40
30	50
35	60
40	70
45	80
50	100
55	120
60	140
65	180

(Sumber: Cuomo & Mcdonald, 2014)

Setelah menentukan tinggi *camber* yang akan digunakan, dilanjutkan menganalisis nilai lendutan total pada rencana gelagar jembatan. Lendutan maksimum merupakan ketinggian *camber* yang telah dikurangi dengan nilai lendutan yang terjadi pada model jembatan untuk mengetahui opening span yang ada dibawah jembatan sehingga memungkinkan adanya aktivitas dibawah jembatan dengan lebih leluasa. Kemudian, nilai lendutan *camber* dapat diketahui dengan mengalikan nilai lendutan maksimum dengan tinggi *camber* (%).

2.14.3 Perencanaan Trotoar

Berdasarkan syarat dari AASHTO 2017, tebal pelat trotoar pada jalan utama tidak boleh lebih dari 200 mm dan lebar 150 mm karena sebagai aksibilitas pejalan kaki. Adapun lebar minimum yang ditentukan yaitu 1000 mm. Berikut ilustrasi perencanaan trotoar jembatan (AASHTO, 2017) pada Gambar 2.27.



Gambar 2. 27 Ilustrasi Trotoar Tipikal Jembatan
(Sumber: Aashto, 2017)