

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Jembatan merupakan sebuah infrastruktur yang sangat esensial bagi kehidupan manusia. Fungsi dari jembatan adalah sebagai penghubung lalu lintas antara dua jalan yang terhalang oleh rintangan berupa sungai, lembah, selat dan konstruksi lainnya seperti jalan, bangunan, rel kereta api atau jembatan lain (Chen & Duan, 2014). Menurut Kementerian Pertahanan, adanya jembatan atau jalan raya juga memiliki fungsi sebagai penghubung, keamanan sebuah bangsa dapat lebih merata, pertukaran budaya antar daerah, dan mempercepat aktivitas masyarakat di wilayahnya.

Jembatan memiliki arti penting bagi setiap orang namun tingkat kepentingannya akan berbeda pada setiap orang. Contohnya adalah jembatan tunggal yang melewati sungai akan dipandang berbeda bagi setiap orang. Ada orang yang menganggap jembatan adalah infrastruktur yang berperan penting untuk dirinya agar bisa sampai ke tempat kerja, ada juga yang beranggapan bahwa jembatan berperan penting bagi pengiriman logistik untuk kepentingan bisnisnya, dan lain sebagainya. Jika kita melihat dari perspektif pemerintah maka jembatan akan berperan penting sebagai penghubung untuk aktifitas ekonomi antar wilayah yang disebaliknya (Supriyadi & Muntohar, 2007). Dari penjelasan diatas, dapat difahami bahwa ;

1. Merupakan pengontrol kapasitas dari system
2. Mempunyai biaya tertinggi per mil dari system
3. Jika jembatan runtuh, maka system akan lumpuh

Jika lebar jembatan terlalu kecil dan tidak memiliki kapasitas yang cukup untuk menampung volume kendaraan yang lewat, jembatan bisa menjadi penghambat bagi laju transportasi. Dalam hal ini jembatan berperan sebagai pengontrol dari kapasitas volume dan berat lalu lintas yang akan dilayani oleh system transportasi. Oleh karena itu jembatan dapat dikatakan memiliki fungsi *balancing* pada system transportasi (Supriyadi & Muntohar, 2007).

Dalam 4000 tahun terakhir manusia telah mengenal dan mengembangkan konstruksi jembatan. Jembatan tertua yang masih ada di dunia saat ini adalah Jembatan Zhaozhou di Provinsi Hebei, Republik Rakyat Tiongkok yang



kemungkinan pada awalnya dibangun pada tahun 600 M. Namun, desain dan konstruksi pada saat itu mungkin tidak dipertimbangan untuk aspek teknis perencanaan jembatan pada saat ini. Perencanaan jembatan saat ini menggunakan *calculus-based analysis* dan *detail planning*. Material yang digunakan pada konstruksi jembatan juga berubah. Dari batu dan kayu sebagai material utama berubah menjadi material buatan seperti baja dan beton yang kita kenal hari ini. Berkat pengembangan pada aspek kekuatan dan *quality control* pada material, komponen jembatan menjadi lebih kecil, lebih tipis, lebih ringan untuk mengurangi *self-weight* dan menjadi lebih ekonomis (Fu, 2013).

Rekayasa Jembatan merupakan bidang teknik (khususnya *structural engineering*) yang berurusan dengan survey, perencanaan, desain, analisis, konstruksi, manajemen, dan perawatan Jembatan. Multi disiplin dalam rekayasa jembatan membutuhkan pengetahuan tentang sains dan teknik material alami, material buatan, material komposit, metallurgy, mekanika struktur, statika, dinamika, teori statistic, teori probabilitas, hidrolika, mekanika tanah.

2.1.1. Klasifikasi Jembatan

Tergantung objektif atau tujuan dari klasifikasi, jembatan dapat diklasifikasikan dalam banyak kriteria dan karakteristik. Kebutuhan dalam mengklasifikasikan jembatan dalam banyak kriteria berkembang seiring berkembangnya jembatan yang awalnya hanya berupa jembatan *simple beam* berkembang menjadi jembatan *cable-stayed*. Jembatan selalu diklasifikasikan berdasarkan struktur atasnya, dan struktur atas dapat diklasifikasikan berdasarkan karakteristik yang tertampil pada tabel berikut:

Tabel 2.1.1 Klasifikasi jembatan

No	Klasifikasi Jembatan
1.	<u>Jembatan jalan raya</u>
	<u>Jembatan jalan kereta api</u>
	<u>Jembatan pejalan kaki</u>
2.	<u>Jembatan diatas sungai, danau, atau laut</u>
	<u>Jembatan diatas lembah</u>
	<u>Jembatan diatas jalan</u>
	<u>Jembatan diatas saluran irigasi/ drainase</u>
	<u>Jembatan di dermaga / Jetty</u>

	Jembatan kayu
	Jembatan beton
3. Berdasarkan konstruksi	Jembatan beton prategang
	Jembatan baja
	Jembatan komposit
	Jembatan pelat
	Jembatan pelat berongga
4. Berdasarkan Tipe Struktur	Jembatan gelagar
	Jembatan rangka
	Jembatan pelengkung
	Jembatan gantung
	Jembatan kabel
	Jembatan kantilever
5. Berdasarkan Bentang	Bentang pendek, panjang bentang hingga 15m
	Bentang sedang, panjang bentang hingga 75m
	Bentang menengah, panjang bentang antara 50-150m
	Bentang panjang, panjang bentang >150m
6. Berdasarkan <i>Position-moveable</i>	<i>Bascule bridge</i>
	<i>Swing bridge</i>
	<i>Lift bridge</i>
7. Berdasarkan <i>Interspan relation</i>	<i>Simply supported bridge</i>
	<i>Skewed bridge</i>
8. Berdasarkan kondisi geometric jembatan	<i>Curved bridge</i>
	<i>straight bridge</i>
	<i>Skewed bridge</i>
	<i>Curved bridge</i>

(Sumber : *Bridge Engineering, classification, design loading and analysis Methode 2017*)

2.2. Jembatan Steel Box Girder

2.2.1. Material Gelagar Boks Baja

Pada pedoman *National Highway Institute* pasal 6.2.2.1 dijelaskan bahwa baja structural untuk jembatan secara umum memiliki persyaratan performa yang lebih ketat jika dibandingkan dengan baja yang digunakan di aplikasi structural yang lain. Baja jembatan relative mengalami perubahan suhu yang besar, mengalami siklus beban hidup yang lebih besar, dan lebih sering terekspos oleh lingkungan korosif yang mengandung asam klorida. Selain persyaratan kekuatan dan daktilitas, baja jembatan juga harus memenuhi persyaratan layan tambahan dalam hal ini adalah persyaratan fatik. Baja jembatan juga harus menyediakan kemampuan ketahanan terhadap korosi atmosferis (*atmospheric corrosion*) tambahan di banyak aplikasi dimana baja digunakan dilapisi pelindung yang mahal. Untuk alasan ini, baja structural untuk jembatan dibutuhkan untuk memenuhi persyaratan kekakuan fraktur, dan memberikan tingkat dari ketahanan terhadap korosi, yang secara umum melampaui persyaratan yang dibutuhkan untuk baja structural yang digunakan di aplikasi yang lain.

Berdasarkan *National Highway Institute* pasal 6.2.2.2.1, material baja yang digunakan yang digunakan untuk pelat structural dan *rolled shape* adalah material baja yang sesuai dengan ketentuan ASTM A709/A709M. Pada Berbagai macam mutu baja dicakup oleh peraturan atau spesifikasi ini termasuk Grade 36, Grade 50, Grade 50s, Grade 50W, dan Baja berperforma tinggi / High Performance Steel atau HPS (termasuk HPS 50W, HPS 70W, dan HPS 100W). Angka pada mutu baja mengindikasikan kuat leleh nominal dalam Ksi atau Mpa (dalam satuan internasional). Huruf “w” mengindiaksikan bahwa baja ini adalah *weathering steel*. Besar nilai tungan leleh dan tegangan ultimate dapat dilihat pada tabel 2.1 .

Tabel 2. 21 Properti mekanis dari mutu baja struktural

Grade	Tegangan leleh, ksi [Mpa]	Tegangan ultimate, ksi [Mpa]
36 [250]	36 [250]	58-80 [400-550]
50 [345]	50 [345]	65 [450]
50S [345]	50-65 [345-450]	65 [450]
50W [345] dan HPS 50W [HPS 345W]	50 [345]	70 [485]
HPS 70W [HPS 485 W]	70 [485]	80-110 [585-760]
HPS 100W [HPS 485 W]	100[690]	110-130 [760-895]

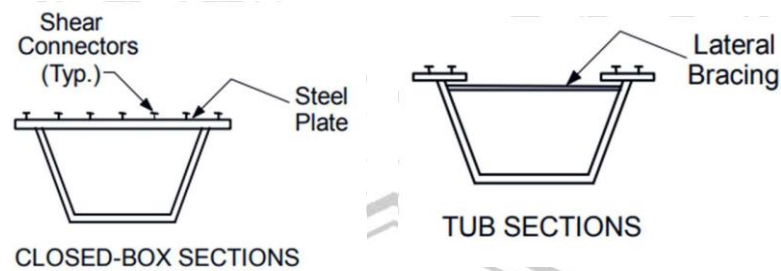
(sumber : AASHTO LRFD 2017)

Berdasarkan penelitian Cahya Witriyatna tentang analisis perbandingan modul jembatan gelagar I dan gelagar box baja sebagai fungsi jembatan jalan raya, hasil perhitungan antara modul jembatan gelagar I dan gelagar box baja dengan bentang 41,15 m untuk jembatan jalan raya dan tinggi 200 cm pada jembatan lebih efektif menggunakan jembatan dengan tipe box girder baja yang berbasis pada SNI yang cukup ampu menahan beban lalu lintas jalan raya mengacu pada SNI 1725-2016. Berdasarkan hasil penelitian tentang analisa perhitungan pembebanan untuk jembatan dengan bentang jembatan 41,15 m yang menggunakan SNI 1725-2016, diketahui terjadi perbedaan pada beban angin dan beban gempa.

Pada penelitian ini menggunakan analisis perhitungan jembatan box girder baja dengan ukuran bentang 35 m. beban yang di perhitungkan adalah beban yang digunakan sesuai dengan fungsi pada jembatan jalan raya. Pada jembatan jalan raya beban akan dikelompokkan dalam 3 kelompok beban yaitu berat sendiri gelagar, beban mati tambahan, dan beban hidup. Pada beban mati tambahan yang di analisis yaitu beban pelat beton (deck slab), aspal, dan diafragma sedangkan untuk beban hidup pada fungsi jalan raya adalah beban D yang terdiri dari beban yang didistribusikan (load distribution) dan beban knife Edge Load (KEL) berdasarkan pembebanan untuk jembatan SNI 1725-2016.

2.2.2. Konfigurasi Penampang Gelagar Boks

Konfigurasi penampang boks dan jembatan merupakan hal yang sangat penting dalam perencanaan jembatan gelagar boks baja. Bentuk dan jumlah dari boks pada penampang mempunyai peran sentral terhadap efisiensi dan estetika jembatan (*National Highway Institute, 2015*). Perencana (dalam hal ini adalah Insinyur) dapat mendesain box girder seefisien dan seekonomis mungkin dengan berdasarkan ketentuan pada pedoman AASHTO LRFD Bridge *Design and Spesification*.



Gambar 2.12 Penampang gelagar boks tipe closed-box dan tipe tube.

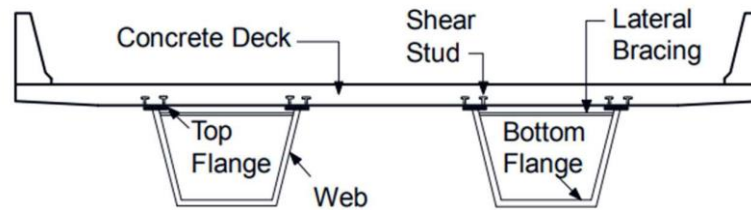
Gelagar boks baja bisa digunakan sebagai stringer, sebagai balok straddle dan pada aplikasi-aplikasi lainnya. Berdasarkan *National Highway Institute* 2015 pasal 6.2.5.3, boks girder dapat berupa penampang tertutup/ closed section (baja terdapat pada keempat sisi) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12, atau penampang tub dengan bagian atas yang terbuka seperti yang ditunjukkan pada gambar. Penampang tub digunakan sebagai stringer dengan deck komposit dipasang pada sayap bagian atas. Penampang tub secara umum memilikiacing lateral menghubungkan kedua flens atas untuk membentuk boks semu atau *pseudo box* yang bisa menahan torsi sebelum deck mengeras. Berdasarkan *National Highway Institute* pasal 6.3.5.2, pada penampang tub, deck komposit berperan sebagai sisi atas yang menutup penampang tub dan membentuk sebuah boks. Ada kasus tertentu dimana lateral bracing boleh dihilangkan. Pada kasus ini, penampang tub berperilaku sebagai penampang terbuka sampai deck mengeras.

Menurut *National Highway Institute* pasal 6.3.5.2 penampang box tertutup (closed-box section) didefinisikan di pedoman AASHTO LRFD sebagai batang lentur yang mempunyai penampang yang terdiri dari dua web vertical atau miring yang ditutup dengan pelat baja pada bagian atasnya. Pelat atas secara khusus berperan sebagai deck diantara web. Boks baja tertutup bisa mempunyai keuntungan biaya jika dibanding tub yang diberi lateral bracing ketika terjadi torsi yang sangat besar.

Pada *National Highway Institute* pasal 6.3.5.2 dijelaskan bahwa boks girder tertutup mempunyai keuntungan karena tertutup rapat dan kedap udara. Pengalaman telah mendemonstrasikan bahwa korosi didalam boks baja tertutup

tidak signifikan ketika boks tertutup rapat. Penampang tidak harus tertutup rapat untuk menghindari korosi pada bagian interior apabila ada ketentuan yang mengharuskan adanya drainase dan lubang sirkulasi udara. Sebaliknya, penampang tub tidak bisa tertutup rapat ke udara dikarenakan kelembaban bisa masuk melalui deck beton, namun, korosi dari interior gelagar penampang tub menjadi minimum ketika penampang tub memiliki drainase dan berventilasi. Tub girder trapezoidal, seperti pada gambar 6.3.5.2-2, adalah konfigurasi yang paling populer di dunia. Mengecat interior penampang tub dengan warna terang akan membantu dan memudahkan pekerja yang menginspeksi untuk mendeteksi segala retak fatik pada girder. Warna cerah juga dapat mengurangi pertambahan temperatur akibat radiasi matahari dari tub sebelum deck dipasang. Kualitas cat tidak perlu disamakan dengan cat yang biasa digunakan pada permukaan eksterior (*National Highway Institute, 2015*).

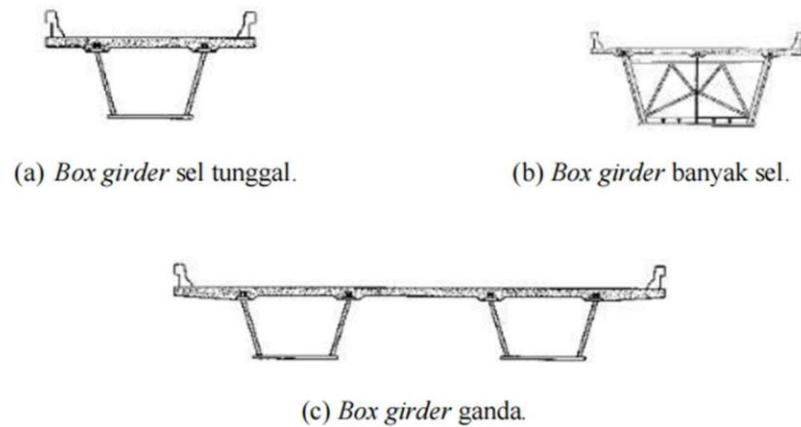




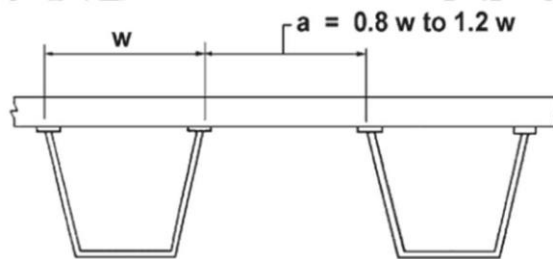
Gambar 2. 13 Konfigurasi penampang boks girder

Satu alasan yang membuat tub girder populer adalah dibolehkannya spasi yang lebar antara web dibagian atas dan relative sempit pada sayap baja pada bagian bawah.

Dalam *Bridge Engineering Handbook 2nd Superstructure Design* (2003), *box girder* digunakan secara luas dalam pembangunan jalan raya perkotaan, jembatan melengkung horizontal dan bentang Panjang. *Box girder* memiliki kapasitas lentur yang lebih tinggi dan kekauan torsional. Jembatan *box girder* komposit memiliki beberapa jenis yaitu, *box girder* sel tunggal, *box girder* dengan banyak sel dan *box girder* ganda seperti terlihat pada Gambar 2. 14. *Box girder* sel tunggal (Gambar 2. 14a) mudah untuk dianalisis dan bergantung pada kekakuan torsi untuk membawa beban eksentrik dan kekakuan lentur yang diperlukan tidak tergantung pada kekakuan torsional. *Box girder* dengan banyak sel (Gambar 2. 14 b) ekonomis untuk rentang yang sangat panjang. Beberapa *web* mengurangi berbagai gaya geser. Kotak-kotak dalam *box* ganda relatif kecil dan berdekatan, hal ini membuat kekakuan lentur dan torsional biasanya sangat tinggi. Kekakuan torsional *box* individual umumnya kurang penting daripada kekauan lentur relatif, untuk desain *box* ganda (Gambar 2. 14c) batasan atau jarak bersih antar *box*, a , ditunjukkan pada Gambar 2. 15 (Chen & Duan, 2004).



Gambar 2. 14 Tipe potongan bagian *box girder* komposit (Chen dan Duan, 2004)



Gambar 2. 15 Jarak antar *box girder* (Nationa, 2004).

2.2.3. Perencanaan *Steel Box Girder*

Dalam *AASHTO 2017 8th EDITION* perencanaan *box girder* baja memiliki langkah-langkah sebagai berikut ini:

2.2.3.1 Penentuan tinggi *box girder*

Dalam penentuan tinggi *box girder* telah dilakukan banyak studi dan penelitian untuk memenuhi syarat kinerja dalam menahan momen dan gaya yang terjadi. Tinggi *box girder* mempengaruhi berat keseluruhan. Penentuan tinggi *box girder* sangat menentukan untuk biaya desain. Dalam *AASHTO LRFD* pasal 2.5.2.6.3 dijelaskan untuk menentukan tinggi gelagar pada tabel berikut:

Tabel 2. 22 kedalaman gelagar

Matrial	Struktur Atas Tipe	Kedalaman minimum (termasuk <i>deck</i>)		
		Bentang sederhana	Bentang Menerus	
Beton Bertulang	slab dengan tulangan utama paralel dengan lalu lintas	$\frac{1,2(S+10)}{30}$	$\frac{s + 10}{30} \geq 0,54 \text{ ft}$	
	Balok T	0,070L	0,065L	
	Balok boks	0,060L	0,055L	
	Balok struktur pejalan kaki	0,035L	0,033L	0,033
Beton Prategang	<i>slab</i>	$0,030L \geq 6,5 \text{ in.}$	$0,027 \geq 6,5 \text{ in.}$	L
	CIP box beam	0,045L	0,040L	
	Balok I pracetak	0,045L	0,040L	
	Balok struktur pejalan kaki	0,033L	0,030L	
	balok boks yang berdekatan	0,030L	0,025L	
Baja	kedalaman balok keseluruhan dari balok I komposit	0,040L	0,032L	
	dari prosi balok I dari balok I komposit			
	Rangka	0,100L	0,100L	

(sumber: AASHTO LRFD Bridge Design and Spesification 2017)

Dengan L merupakan bentang terpanjang dari jembatan

2.2.3.2 Penentuan dimensi *box girder* Tabel 2. 13

Penentuan dimensi *box girder* dalam AASHTO LRFD Pasal 6.11.2 yang terparar di bawah ini:

❖ Pada bagian badan / *Web*

Ketebalan minimal dari *web* tanpa stiffener longitudinal.

$$\frac{D}{tw} \leq 150 \quad 2. 22$$

Ketebalan minimal dari *web* dengan stiffener longitudinal.

$$\frac{D}{tw} \leq 300 \quad 2. 23$$

Dengan:

D = Tinggi web

tw = Tebal web

- ❖ Pada bagian sayap / *Flanges*

Lebar *flanges* yang digunakan

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 12,0 \quad 2.24$$

Atau digunakan rumus pembandingan yang lain :

$$b_f \geq \frac{D}{6} \quad 2.25$$

Lebar *flanges* minimum yang digunakan

$$t_f \geq 1,1 t_w \quad 2.26$$

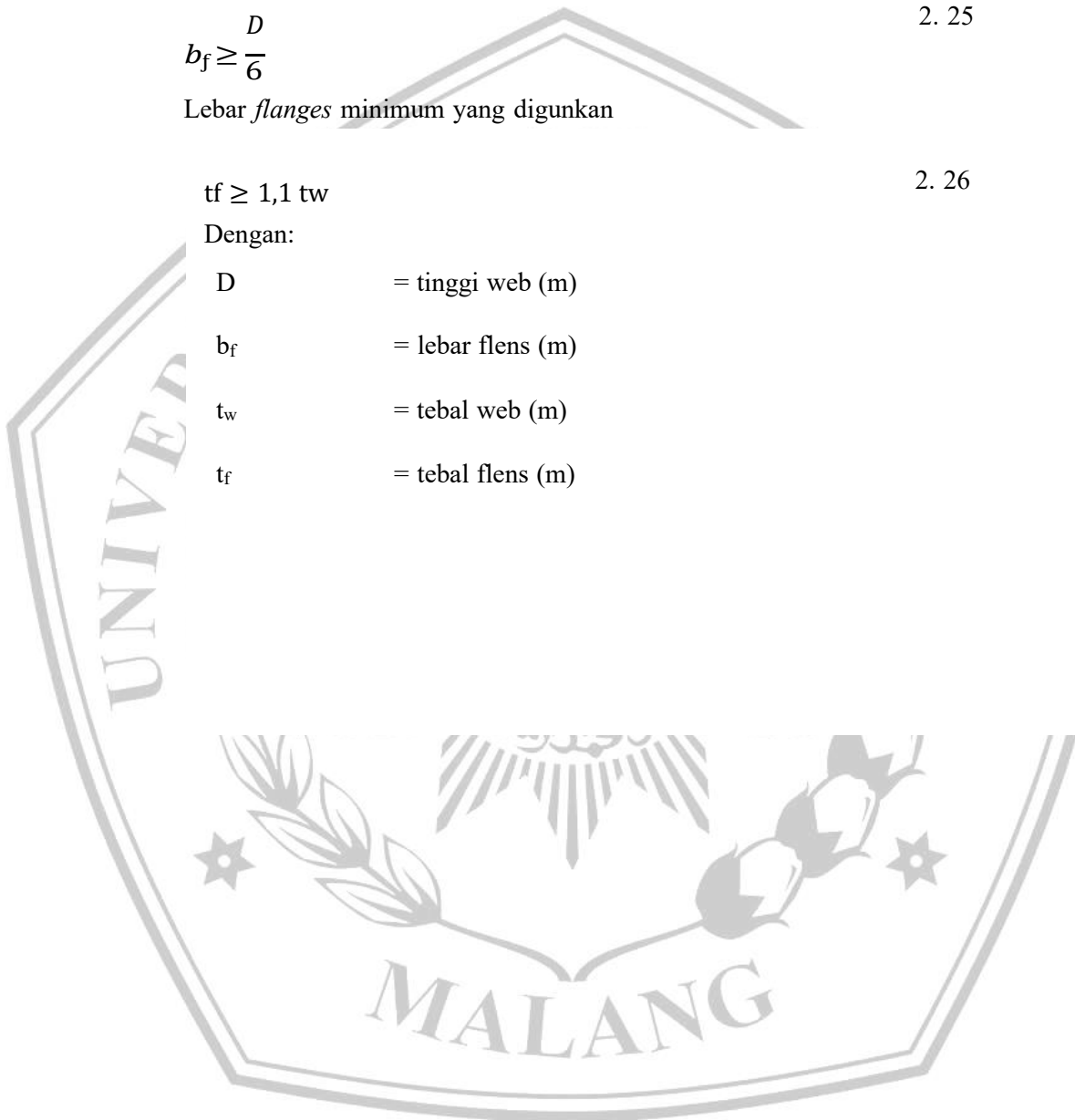
Dengan:

D = tinggi web (m)

b_f = lebar flens (m)

t_w = tebal web (m)

t_f = tebal flens (m)



2.2.3.3 Persyaratan Gelagar Boks Baja Pra-komposit

- ❖ Persyaratan lentur
- Ketahanan lentur nominal sayap boks pada serat tekan, F_{nc}

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad 2.27$$

Dimana:

f_{bu} = tegangan pada serat tekan penampang (kN/m^2)

ϕ_f = Faktor reduksi untuk lentur = 1,0

F_{nc} = Ketahanan lentur nominal sayap boks pada serat tekan

Yang mana:

$$f_{bu} = \frac{M}{S^t} \quad 2.28$$

Dimana:

M = Momen maksimum pada fase kritis saat konstruksi

S^t = Serat atas penampang

Persamaan untuk f_{nc}

- Jika $\lambda_f \leq \lambda_p$, maka:

$$F_{nc} = R_b \cdot R_h \cdot F_{yc} \cdot \Delta$$

- Jika $\lambda < \lambda_f \leq \lambda_p$, maka:

$$F_{nc} = R_b \cdot R_h \cdot F_{yc} \cdot \left[\Delta - \left(\Delta - \frac{\Delta - 0,3}{R_h} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_p}{\lambda_f - \lambda_p} \right) \right]$$

- Jika $\lambda_f > \lambda_p$, maka:

$$= \frac{0,9 \cdot E \cdot R_b \cdot k}{\lambda^2}$$

Dimana:

R_b = Faktor load-shedding web

R_h = Faktor Hybrid

Yang mana:

$$\lambda_f = \frac{b_{tf}}{2t_{tf}} \quad 2.29$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad 2.30$$

$$\lambda_r = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad 2.31$$

Dengan:

λ_f = rasio kelangsingan pelat sayap atas

λ_p = rasio kelangsingan sayap kompak

λ_r = rasio kelangsingan sayap tidak kompak

E = modulus elastisitas baja (MPa)

F_y = tegangan leleh baja (MPa)

b_f = lebar pelat sayap atas (m)

t_f = tebal pelat sayap atas (m)

- Ketahanan bend-buckling nominal web boks, F_{crw}

$$f_{bu} \leq \phi F_{crw} \quad 2.32$$

Dimana:

F_{crw} = Ketahanan bend-buckling nominal web boks (kN/m²)

$$F_{crw} = \frac{0,9 EK}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \quad 2.33$$

Dimana:

k = koefisien bend-buckling.

E = Modulus Elastisitas (Mpa).

D = Kedalaman gelagar (m).

$$k = \frac{9}{\left(\frac{D_c}{D}\right)^2} \quad 2.34$$

Dimana:

D_c = Kedalaman web pada serat tekan.

❖ Persyaratan geser

$$V_u \leq \phi_v V_{cr} \quad 2.35$$

Dimana :

V_u = Gaya geser ultimit (kN)

V_{cr} = Ketahanan tekuk geser (kN)

$$V_n = V_{cr} = C \cdot V_p \quad 2.36$$

Yang mana :

$$V_p = 0,58 F_y D t_w \quad 2.37$$

Dimana :

V_n = Ketahanan geser nominal (kN)

V_{cr} = Ketahanan tekuk geser (kN)

V_p = Gaya geser plastis (kN)

C = Rasio ketahanan tekuk geser disbanding dengan kekuatan leleh geser.

Rasio, C , ditentukan dengan spesifikasi sebagai berikut:

$$\text{- jika } \frac{D}{t_w} \leq 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = 1,0$$

$$\text{- Jika } 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} < 1,40 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1,12}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$\text{- Jika } \frac{D}{t_w} > 1,40 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1,57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \left(\frac{E_k}{F_{yw}}\right)$$

Yang mana:

k = koefisien tekuk geser

$$= 5 + \frac{5}{\left(\frac{d_o}{D}\right)^2}$$

2.2.3.4 Persyaratan Gelagar Boks Pos-komposit

❖ Persyaratan Deformasi Elastis

Berdasarkan AASHTO LRFD pasal 2.5.2.6.2 dijelaskan bahwa jembatan dengan material structural baja, aluminium, dan beton harus memenuhi persyaratan defleksi sebagai berikut.

Tabel 2. 23 Persyaratan defleksi

No.	Beban pada jembatan	Defleksi, Δ
1	Beban kendaraan	L/800
2	Beban kendaraan dan pejalan kaki	L/1000
3	Beban kendaraan pada lengan kantilever	L/300
5	Beban kendaraan dan pejalan kaki pada lengan kantilever	L/375

❖ Persyaratan Deformasi Plastis

Berdasarkan AASHTO LRFD pasal 6.10.4.2.2 disyaratkan bahwa tegangan pada serat atas dan bawah harus memenuhi persyaratan sebagai berikut

$$f_f \leq 0,95R_h F_{yf} \quad 2.38$$

Yang mana :

$$f_f = \frac{M_u}{S_x} \quad 2.39$$

Dimana:

f_f = Tegangan pada masing-masing serat (kN/m^2)

R_h = Faktor hybrid, $R_h = 1$ untuk peampang homogen

F_y = Tegangan leleh baja (Mpa)

M_u = Momen ultimit (kNm)

S_x = Momen tahanan/ Modulus penampang (m^3)

❖ persyaratan Lentur

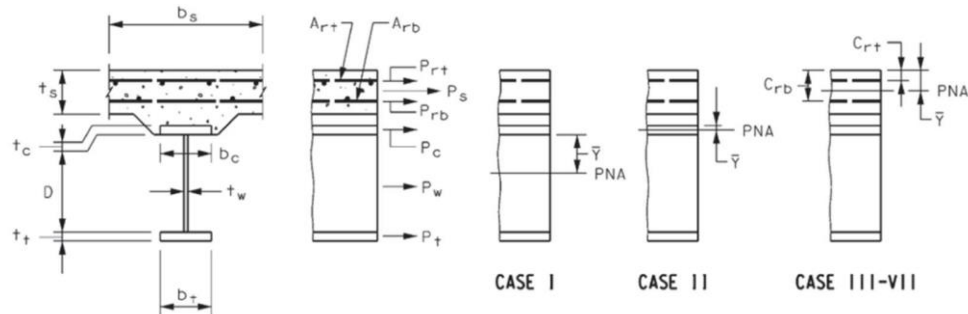
Persyaratan lentur untuk Langkah pertama yang harus dilakukan pada persyaratan lentur adalah mencari letak dari sumbu netral plasti, PNA yang sesuai pada tabel berikut:

Tabel 2. 24 Sumbu netral plastis dan momen plastis pada gelagar boks baja.

Case	PNA	Kondisi	\bar{Y} dan M_p
2.3	di web $P_t + P_w \geq$	$P_c + P_s + P_{rb} + P_{rt}$	$\bar{Y} = \left(\frac{D}{2}\right) \left[\frac{P_t - P_c - P_s - P_{rt} - P_{rb}}{P_w} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_w}{2D} [\bar{Y}^2 + (D - \bar{Y})^2] +$ $[P_s d_s + P_n d_n + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_t d_t]$
2.4	di flens atas	$P_t + P_w + P_c \geq$ $P_s + P_{rb} + P_{rt}$	$\bar{Y} = \left(\frac{t_c}{2}\right) \left[\frac{P_w + P_t - P_s - P_{rt} - P_{rb}}{P_c} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_c}{2t_c} [\bar{Y}^2 + (t_c - \bar{Y})^2] +$ $[P_s d_s + P_n d_n + P_{rb} d_{rb} + P_w d_w + P_t d_t]$
2.5	deck beton, dibawah P_{rb}	$P_t + P_w + P_c \geq$ $\left(\frac{C_{rb}}{t_s}\right) P_s + P_{rb} + P_{rt}$	$\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_c + P_w + P_t - P_{rt} - P_{rb}}{\bar{Y}^2 P_s} \right]$ $M_p = \left(\frac{s}{2t_s}\right) +$ $[P_n d_n + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$
2.6	deck beton,pada P_{rb}	$P_t + P_w + P_c + P_{rb} \geq$ $\left(\frac{C_{rb}}{t_s}\right) P_s + P_{rt}$	$\bar{Y} = C_{rb}$ $M_p = \left(\frac{s}{2t_s}\right) +$ $[P_n d_n + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$
2.7	deck beton, diatas p_{rb} dibawah p_{rt}	$P_t + P_w + P_c +$ $P_{rb} \geq \left(\frac{C_{rt}}{t_s}\right) P_s + P_{rt}$	$\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_{rb} + P_c + P_w + P_t - P_{rt}}{P_s} \right]$ $M_p = \left(\frac{s}{2t_s}\right) +$ $[P_n d_n + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$
2.8	deck beton,pada P_{rt}	$P_t + P_w + P_c + P_{rb} + P_{rt} \geq$ $\left(\frac{C_{rt}}{t_s}\right) P_s$	$\bar{Y} = C_{rt}$ $M_p = \left(\frac{s}{2t_s}\right) +$ $[P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$
2.9	deck beton, pada p_{rt}	$P_t + P_w + P_c + P_{rb} + P_{rt} \geq$ $\left(\frac{C_{rt}}{t_s}\right) P_s$	$\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_{rb} + P_c + P_w + P_t + P_{rt}}{P_s} \right]$ $M_p = \left(\frac{s}{2t_s}\right) +$ $[P_n d_n + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$

(sumber : AASHTO LRFD 2017)

Dari tabel diatas dijelaskan bahwa persamaan untuk mencari PNA dan momen plastis akan bergantung pada boks masuk kedalam kasus yang mana. Gambar dibawah menjelaskan lebih detail tentang kasus pada gelagar boks baja.



Gambar 2. 16 Kasus untuk mencari PNA dan momen plastis

Yang mana:

$$P_{rt} = F_{yrt} \times A_{rt}$$

$$P_s = 0,85 \times f_c' \times b_s \times t_s$$

$$P_{rb} = F_{yrb} \times A_{rb}$$

$$P_c = F_{yc} \times b_c \times t_c$$

$$P_w = 2 \times F_{yw} \times D \times t_w$$

$$P_t = F_{yt} \times b_t \times t_t$$

Dimana:

$$F_y = \text{Tegangan leleh baja (Mpa)}$$

$$f_c' = \text{Tegangan tekan beton (Mpa)}$$

$$A_{rt} = \text{Luas tulangan atas pelat lantai (mm}^2\text{)}$$

$$A_{rb} = \text{Luas tulangan bawah pelat lantai (mm}^2\text{)}$$

$$b_s = \text{Lebar Pelat beton (mm)}$$

$$b_c = \text{Lebar sayap atas yang mengalami tekan (mm)}$$

$$b_t = \text{Lebar sayap bawah yang mengalami tarik (mm)}$$

$$t_s = \text{Tebal slab beton (mm)}$$

$$t_w = \text{Tabal web (mm)}$$

$$t_c = \text{Tebal sayap atas yang mengalami tekan (mm)}$$

$$t_t = \text{tebal sayap bawah}$$

- P_{rt} = Gaya akibat tulangan atas (kN)
 P_s = gaya tekan pelat beton (kN)
 P_{rb} = gaya akibat tulangan bawah (kN)
 P_c = gaya tekan pada sayap atas (kN)
 P_w = gaya pada web (kN)
 P_t = gaya tarik pada sayap bawah (kN)

Pelat sayap dalam menahan lentur harus memenuhi persyaratan yang dijelaskan dalam sebagai berikut:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 5,7\sqrt{\frac{E}{fy}} \quad 2.40$$

- D_e = tinggi elastis pelat badan (m)
 = PNA – Pelat beton - tf
 t_w = tebal pelat badan (m)
 E_s = modulus elastisitas baja (MPa)
 f_y = tegangan leleh baja (MPa)

❖ Persyaratan Geser

$$V_u \leq \phi_v V_{cr} \quad 2.41$$

Dimana :

- V_u = Gaya geser ultimit (kN)
 V_{cr} = Ketahanan tekuk geser (kN)

$$V_n = V_{cr} = C \cdot V_p \quad 2.42$$

Yang mana :

$$V_p = 0,58 F_y D t_w \quad 2.43$$

Dimana :

- V_n = Ketahanan geser nominal (kN)
 V_{cr} = Ketahanan tekuk geser (kN)
 V_p = Gaya geser plastis (kN)

C = Rasio ketahanan tekuk geser disbanding dengan kekuatan leleh geser.

Rasio, C, ditentukan dengan spesifikasi sebagai berikut:

$$\text{- jika } \frac{D}{t_w} \leq 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = 1,0$$

$$\text{- Jika } 1,12 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} < 1,40 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1,12}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$\text{- Jika } \frac{D}{t_w} > 1,40 \sqrt{\frac{E_k}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1,57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \left(\frac{E_k}{F_{yw}}\right)$$

Yang mana:

k = koefisien tekuk geser

$$= 5 + \frac{5}{\left(\frac{d_o}{D}\right)^2}$$

2.2.3.5 Persyaratan tekuk torsi lateral sayap atas

Pada struktur yang menerima lentur, tekuk global dapat terjadi apabila tidak ada dukungan lateral sehingga struktur akan terpelintir ketika sayap bagian tekan (sayap atas) bergerak secara lateral. Perilaku ini didefinisikan sebagai tekuk torsi lateral atau *lateral torsional buckling*. Persyaratan gelagar dalam menerima lentur harus juga memperhatikan tekuk torsi lateral yang ditentukan dengan sebagai berikut:

$$L_p = 1,0 r_1 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad 2.44$$

$$L_r = \pi r_1 \sqrt{\frac{E}{F_{yxr}}} \quad 2.45$$

Dengan:

L_p = batas panjang maksimal tanpa pengikat lateral (m)

L_r = batas panjang minimal tanpa pengikat lateral (m)

r_t = jari-jari girasi (m)

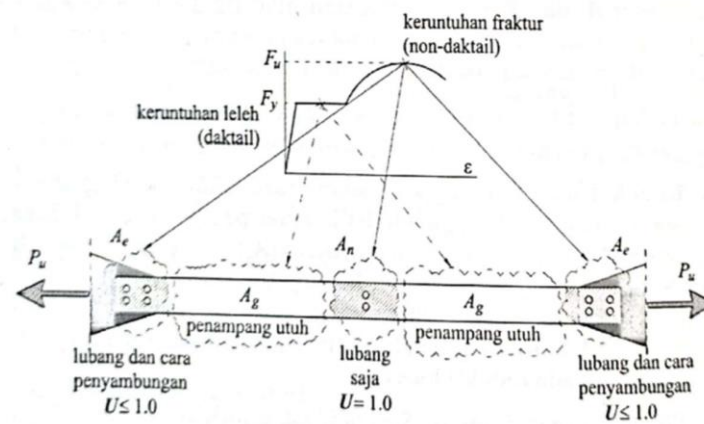
F_y = tegangan leleh baja (MPa)

F_{yr} = tegangan tekan pelat sayap (MPa)

E = modulus elastisitas baja (MPa)

2.2.4. Persyaratan untuk batang yang mengalami tarik

Jika mengacu pada SNI 1729-2015 pasal D6 dan Dewobroto (2016), dapat disimpulkan bahwa ketahanan tarik suatu batang dibagi menjadi dua kriteria yaitu kriteria leleh (yield) pada batang utuh dan kriteria fraktur pada batang berlubang.



Gambar 2. 20 konsep visual perencanaan batang tarik (Sumber: Dewobroto 2016)

Pada bagian tengah batang penampang profil akan cenderung utuh karena sambungan biasanya terletak pada ujung batang. Oleh karena itu pada penampang utuh akan mengalami kegagalan tarik akibat leleh. Ketahanan tarik untuk kriteria leleh (yield) dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = 0,9 F_y A_g \quad 2.55$$

Dimana:

P_n = Ketahanan tarik nominal (kN)

F_y = Tegangan leleh baja (Mpa)

A_g = Luas bruto profil baja yang digunakan (cm²)

Sambung baut biasanya diletakan pada bagian ujung batang tarik. Dengan demikian resiko untuk terjadi kegagalan akibat fraktur akan lebih besar. Ketahanan tarik untuk kriteria fraktur dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = 0,75 F_U A_e \quad 2. 56$$

Yang mana:

$$A_e = A_n \times U$$

Dimana:

$$A_e = \text{Luas efektif penampang (mm}^2\text{)}$$

$$F_u = \text{Tegangan ultimit (Mpa)}$$

$$A_n = \text{Luas neto (mm}^2\text{)}$$

$$U = \text{Faktor shear-lag}$$

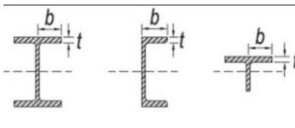
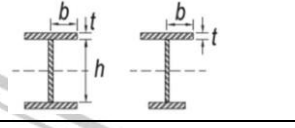
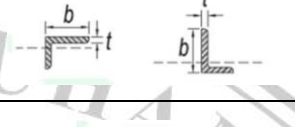

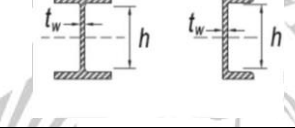

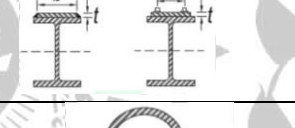

2.2.5. Persyaratan untuk batang yang mengalami tekan

Menurut Dewobroto (2016) rasio kelangsingan dari batang yang mengalami tekan merupakan parameter penting yang dapat menjadi indikator batas kinerja sekaligus pereilakunya. Batang tekan pendek (tidak langsing) kekuatannya ditentukan oleh mutu material. Sedangkan kekuatan batang tekan langsing oleh beban kritis yang menyebabkan batang tertekuk.

Secara visual, tekuk dapat dibedakan menjadi dua yaitu tekuk local dan tekuk global. Tekuk local adalah tekuk yang terjadi pada salah satu atau semua elemen yang ada pada penampang batang. Sedangkan tekuk global adalah tekuk yang terjadi secara menyeluruh.

Batang tekan perlu diklasifikasi berdasarkan rasio b/t untuk menentukan apakah penampang masuk kategori langsing atau tidak langsing. Penampang langsing akan mengalami tekuk sehingga penggunaan penampang langsing pada batang tekan perlu dihidari. Klasifikasi penampang dapat ditentukan berdasarkan tabel dibawah.

Tabel 2. 26 Klasifikasi elemen pada batang tekan aksial

Elemen	Rasio lebar tebal	λ_r , batas tidak langsing	Deskripsi Penampang
Sayap profil gilas I-WF, UNP, dan Tee	$\frac{b}{t}$	$0,56\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Sayap profil tersusun I-WF simetri ganda dan tunggal	$\frac{b}{t}$	$0,64\sqrt{\frac{K_c E}{F_L}}$	
Lengan profil siku tunggal atau ganda	$\frac{b}{t}$	$0,45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Lengan profil Tee	$\frac{d}{t}$	$0,75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Badan profil I simetri ganda	$\frac{h}{t_w}$	$1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Sayap profil kotak ketebalan sama	$\frac{h}{t}$	$1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Sayap pelat penutup/diafragma antar alat sambung	$\frac{b}{t}$	$1,4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Pipa	$\frac{D}{t}$	$0,11\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

(Sumber: SNI 1729-2015 & Dewobroto, 2016)

Leonhard Euler pada tahun 1744 merumuskan besarnya beban aksial tekan, P , sesaat sebelum batang tekan mengalami tekuk yang disebut gaya aksial kritis, P_{cr} . Gaya aksial kritis dapat ditentukan melalui persamaan sebagai berikut:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad 2.57$$

Maka :

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad 2.58$$

Dengan :

P_{cr} = gaya aksial tekan kritis (kN)

F_{cr} = Tegangan kritis (Mpa)

- A = Luas penampang (mm^2)
 E = Modulus Elastisitas Baja (Mpa)
 I = Momen inersia (mm^4)
 L = Panjang batang tekan (mm)
 K = Faktor panjang efektif

Faktor panjang efektif dapat ditentukan berdasarkan tabel berikut:

Tabel 2. 27 nilai faktor panjang efektif, K

Garis putus menunjukkan posisi kolom pada saat tertekuk						
	k teoritis	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0
k disain	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Keterangan	jepit	sendi	rol tanpa rotasi	ujung bebas		

Setelah parameter-parameter diatas berhasil didapat, langkah selanjutnya adalah menghitung kuat nominal batang tekan, P_n . Kuat nominal batang tekan dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = \phi F_{cr} \cdot A_g \quad 2.59$$

Dengan:

P_n = gaya aksial tekan nominal (kN)

F_{cr} = Tegangan kritis (Mpa)

A = Luas penampang (mm^2)

Yang mana:

jika $\frac{KL}{r} \leq 4,71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$, tekuk inelastis, maka:

$$F_{cr} = (0,658^{E_y}) F_y \quad 2.60$$

jika $\frac{KL}{r} \leq 4,71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$, tekuk inelastis, maka:

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad 2.61$$

Dan

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad 2.62$$

2.3. Perencanaan Sambungan Baut

Menurut AASHTO LRFD Pasal 6.13.1 kecuali jika ada spesifikasi khusus, sambungan dan splice untuk batang utama yang hanya mengalami tarik aksial atau tekan harus didesain pada kekuatan keadaan batas yang tidak kurang dari ;

- Rata-rata dari efek gaya aksial terfaktor pada titik sambungan dan resistensi aksial terfaktor dari batang atau elemen pada titik yang sama, atau
- 75% dari resistensi aksial berfaktor dari batang atau elemen

Sambungan dan splice untuk batang utama yang mengalami efek gaya kombinasi, Selain splice untuk batang lentur sebaiknya didesain pada batas kekuatan sebesar ;

- Efek gaya terfaktor kombinasi yang dihitung, atau
- 75 % dari ketahanan/resistensi aksial terfaktor dari batang

2.3.1. Tipe Sambungan Baut

Menurut AASHTO LRFD Pasal 6.13.2.1, bagian baja pada baut bisa dilapisi atau tidak dilapisi dan sebaiknya cocok secara solid setelah baut dikencangkan.

Join baut berkekuatan tinggi/ *High strength Bolts* sebaiknya direncanakan sebagai *slip-critical* atau sambungan *Bearing-type*. Untuk sambungan *slip-critical* . nilai gesekan sebaiknya konsisten dengan kondisi yang dispesifikasi dari permukaan yang sealing terjadi kontak / *faying surface* seperti yang

dispesifikasikan pada pasal 6.13.2.8 di AASHTO LRFD . semua matrial di didalam grip baut sebaiknya matral baja.

2.3.1.1 Sambungan Slip-kritis

Menurut AASHTO LRFD pasal 6.13.2.1.1 ,Join mengalami tegangan reversal, *heavy impact load*, getaran parah atau berloaksi diaman tegangan dan regangan yang disebabkan kelicinan joint akan merugikan kemampuan layan dari struktur harus harus ditujuk sebagai *slip-critical*. Berikut adalah keadaan yang masuk untuk direncanakan sebagai sambungan *slip-critical* ;

- Joint yang mengalami beban fatik.
- Sambungan geser dengan sambungan baut yang dipasang pada lubang yang lebih besar/ *oversized hole*.
- Joint geser yang dipang pada lubang *short-and long slotted* dimana gaya pada join tidak tegak lurus terhadap sumbu, kecuali dimana perencana bermakud sealiknya dan seperti yang ditunjukkan di dokumen kontrak.
- Joint mengalami beban reversal yang signifikan.
- Joint dimana baut dan las berbargi dalam mentransmisikan beban pada kedua permukaan yang teradi kontak / *faying surface*.
- Joint yang mengalami tekan aksial saja, dengan lubang stadar atau lubang berslot di hanya satu lapis sambungan dengan arah dari beban tegak lurus dengan arah slot, kecuali untuk sambunagn yang didesain menurut ketentuan yang dispesifikasikan pada pasal 8.13.6.1.2 di AASHTO LRFD.
- Joint dimana, judgment dari insinyur perencana, semua slip akan kritis terhap performa joint atau struktur dan yang ditunjukkan begitu pada dokumen kontrak

Sambungan dari *slip-critical* sebagiknya diproporsikan untuk mencegah slip saat beban kombiasi layan 2, seperti yang dispesifikasikan pada tabel 3.4.11, dan untuk menyediakan resistensi tarik , geser dan bearing pada kombinasi keadaan batas kekuatan yang berlaku. Ketentuan pada pasal 6.13.2.2 diterapkan.

❖ Ketahanan Terhadap Slip

Ketahanan slip nominal pada baut sambungan Slip-critical harus diambil sebagai :

$$R_n = K_h K_s N_s P_t$$

2. 67

Dimana :

N_s = Jumlah bidang slip perbaut.

P_t = Persyaratan minimum gaya tarik baut / Bolt tension

K_h = faktor ukuran lubang yang dispesifikasikan di tabel 6.13.2.8-2.

K_s = Faktor kondisi permukaan yang dispesifikasikan di tabel 6.13.2.8-3.

Tabel 2. 30 Persyaratan tarik minimum baut, P_t

Diameter Baut (mm)	Persyaratan tarik baut minimum, P_t (kN)	
	Baut A325 M	Baut A490M
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334
M30	326	408
M36	475	595

(Sumber : SNI 1729-2015 dan AASHTO LRFD Bridge Design and Specification)

Tabel 2. 31 Nilai K_h untuk tiap jenis lubang.

Nilai dari K_h		
No.	Untuk Lubang standar	1
1	Untuk lubang oversize dan slot- pendek	0,85
2	Untuk lubang slot-panjang dengan slot tegak lurus dengan arah gaya	0,75
3	Untuk lubang slot-panjang dengan slot paralel dengan arah gaya	0,6

(Sumber : AASHTO LRFD Bridge Design and Specification)

Tabel 2. 32 Nilai K_s untuk tiap jenis kondisi permukaan

Nilai dari K_s	
Untuk kondisi permukaan kelas A	0,3
Untuk kondisi permukaan kelas B	0,5
Untuk kondisi permukaan kelas C	0,3
Untuk kondisi permukaan kelas D	0,35

(Sumber: AASHTO LRFD Bridge Design and Specification)

Berikut merupakan diskripsi dari kondisi permukaan harus diterapkan sesuai tabel :

- Permukaan Kelas A : *Unpainted clean mill scale* dan *blast-cleaned surface* dengan lapisan coating kelas A
- Permukaan Kelas B : permukaan *Unpainted blast-cleaned* untuk SSPC-SP 6 atau lebih baik, dan permukaan *blast-cleaned* dengan lapisan/coating kelas B, atau *zinc* murni yang tidak tersegel atau lapisan/ coating menggunakan *thermal-spray zinc/ aluminium 85/15* dengan tebal kurang dari atau sama dengan 16 mils
- Permukaan Kelas C : permukaan yang digalvanisasi *hot-dip*
- Permukaan Kelas D : Permukaan *blast-cleaned* dengan lapisan/coating kelas D.

Dokumen kontrak harus memspesifikasi joint yang tidak dilapisi, cat, termasuk semprotan berlebihan yang tidak sengaja, tidak diikutsertakan dari area yang lebih dekat 1 kali diameter tetapi tidak kurang dari 1 in dari tepi lubang dan semua luasan didalam pola baut.

Tergantung pada persetujuan insinyur, pelapisan menyediakan faktor kondisi permukaan kurang dari 0,30 mungkin digunakan asalkan faktor kondisi permukaan didapat dari test. Resistensi slip nominal sebaiknya ditentukan sebagai resistensi slip nominal untuk kondisi permukaan kelas A, sesuai dengan tipe lubang dan baut, kali factor kondisi permukaan yang ditentukan dengan test dibagi 0,3.

2.3.1.2 Sambungan Bearing-Type

Menurut AASHTO LRFD pasal 6.13.2.1.2 ,Sambungan tipe bearing sebaiknya diizinkan hanya untuk joint yang mengalami kompresi aksial atau joint pada batang bracing dan harus memenuhi resistensi terfaktor, R_r ,pada keadaan batas kekuatannya/ strenght limit state.

Pada sambungan baut tipe *bearing-type* , beban akan ditahan oleh geser di sambungan dan *bearing* pada matrial yang terkoneksi/tersambung, ditambah beberapa jumlah friksi yang tidak tentu antar *faying surface*. Kegagalan akhir/*final*

failure bisa disebabkan oleh kegagalan pada sambungan, oleh sobeknya batang yang terkoneksi, atau oleh ovaliasi lubang yang tidak dapat diterima. Beban kegagalan akhir atau *final failure* tidak tergantung pada gaya ikat/ rekat / *clamping force* yang disediakan oleh baut.

2.3.1.3 Sambungan Momen baut

Perhitungan sambungan momen baut pada jembatan box girder baja merupakan aspek krusial dalam desain struktur. Beberapa hal terkait perencanaan sambungan momen baut pada jembatan box girder baja:

1. Sambungan kaku (Rigit): sambungan dikatakan kaku jika menggunakan high strength bolt (HSB) dan las. Rangka batang yang direncanakan harus mampu menahan momen primer dan momen sekunder.
2. Dimensi jembatan box girder baja: berdasarkan ASSHTO LRFD 2012, dimensi girder box dapat ditentukan. Contohnya, bada girder memiliki dimensi 3300 x 25 mm, sayap atas 700 x 30 mm, dan sayap bawah 1900 x 40 mm. profil diafragma dan pengaku juga memerlukan dimensi yang sesuai.
3. Lendutan. Penting untuk memperhitungkan lendutan yang terjadi pada jembatan. Pada jembatan dengan geometri lurus, lendutan cenderung lebih besar dibandingkan dengan jembatan berbentuk tikungan. Hal ini dipengaruhi oleh jumlah pilar di kedua jembatan yang berbeda.

Perencanaan sambungan momen baut harus mempertimbangkan factor keamanan, kekuatan, dan stabilitas struktur. SNI 03-1729-2002 PASAL 13.2.2. menyatakan, suatu baut yang memikul gaya terfaktor, R_u harus memenuhi syarat berikut,

$$R_u \leq \phi R_n$$

Dengan:

ϕ = factor reduksi kekuatan = 0,75

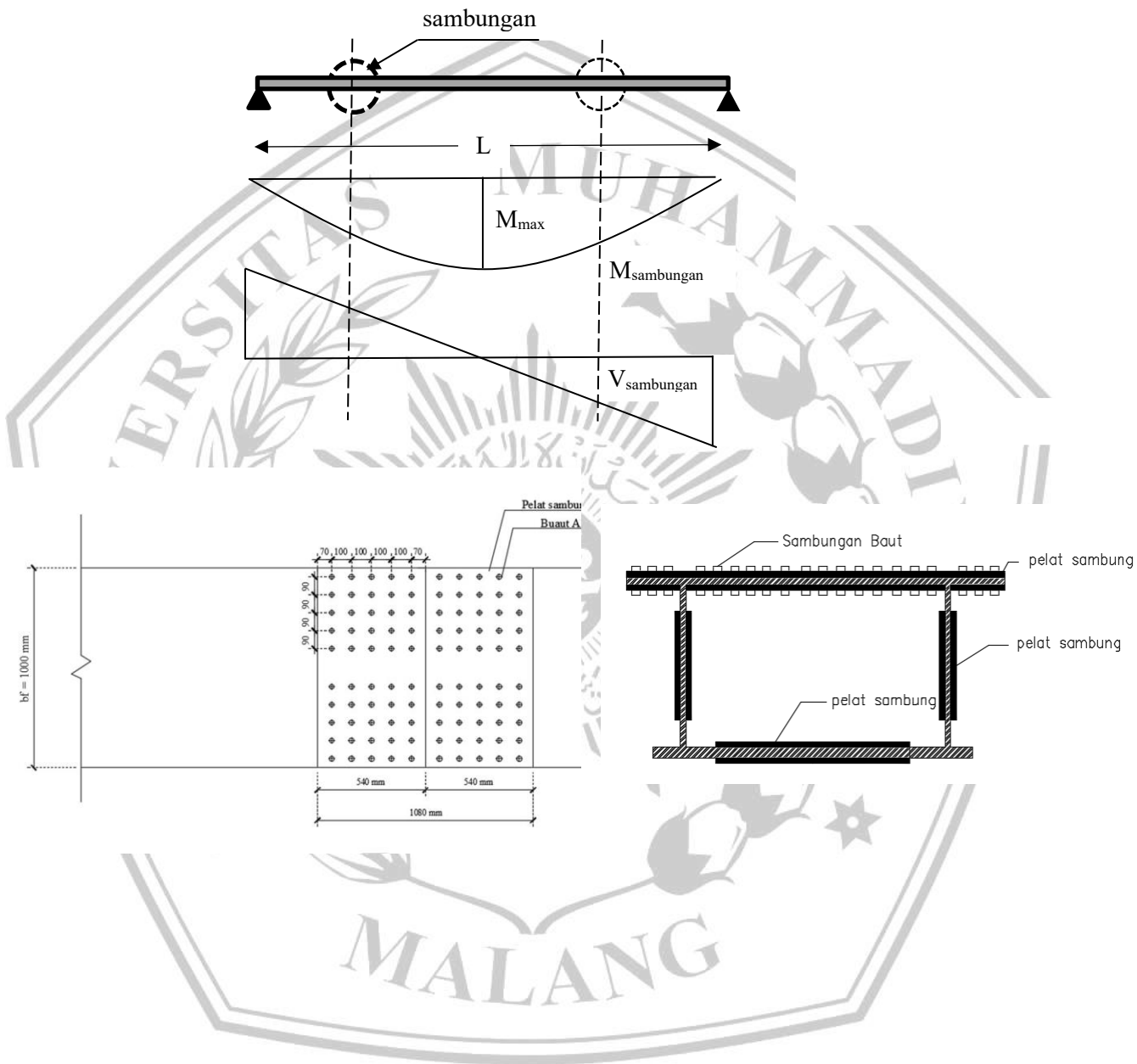
R_n = kuat nominal baut

Pada sambungan tipe friksi yang menggunakan baut mutu tinggi yang slipnya dibatasi, satu baut yang hanya memikul geser terfaktor, dalam bidang permukaan friksi harus memenuhi kuat geser nominal.

$$R_n = 1,13 \cdot \phi \cdot \mu \cdot m \cdot T_b$$

Kuat rencana slip R_u direduksi dengan factor

$$\left[1 - \frac{T_u}{1,137T_b}\right]$$



2.3.2. Lubang pada baut

2.3.2.1 Tipe lubang pada baut

❖ Lubang standar

AASHTO LRFD pasal 6.13.2.4a menspesifikasikan bahwa lubang standard sebaiknya dipakai pada sambungan baut kekuatan tinggi.

❖ Oversize Holes

Pada AASHTO LRFD pasal 6.13.2.4b menjelaskan bahwa Lubang yang *oversize* bisa digunakan pada semua lapisan pada sambungan tipe *slip-critical*. Lubang yang *oversize* sebaiknya tidak digunakan pada sambungan tipe bearing.

❖ Lubang dengan slot pendek

Dalam AASHTO LRFD pasal 6.13.2.4c disepesifikasikan bahwa Lubang dengan slot pendek bisa digunakan di semua lapisan dari sambungan tipe slip-critical atau bearing-type. Pada sambungan tipe slip-critical slot bisa digunakan tanpa melihat arah dari beban, namun pada sambungan bearing-type panjangnya harus normal terhadap arah beban.

❖ Lubang Dengan Slot Panjang

AASHTO LRFD pasal 6.13.2.4d menjelaskan bahwa lubang dengan slot panjang bisa digunakan hanya untuk 1 lapis dari sambungan slip critical atau sambungan bearing-type. Lubang slot panjang bisa digunakan tanpa mempertimbangkan arah dari pembebanan dari sambungan slip-critical tetapi untuk sambungan bearing-type, slot harus normal terhadap arah beban.

2.3.2.2 Ukuran baut

Dimensi dari lubang sebaiknya tidak melebihi ukuran yang diberikan pada tabel dibawah

Tabel 2. 28 Diameter lubang

Diameter Lubang				
Diameter baut	Standar (diameter)	Ukuran-lebih (Diameter)	Slot-Pendek (Lebar x Panjang)	Slot-Panjang (lebar x panjang)
mm	mm	mm	mm	mm
M16	18	20	18 x 22	18 x 40

M20	22	22	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	39	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 2,5d

(Sumber : SNI 1729-2015 dan AASHTO LRFD Bridge Design and Specification)

Menurut AASHTO LRFD pasal 6.13.2.5 diameter baut harus kurang dari 0.625 in. Baut yang memiliki diameter 0.625 sebaiknya tidak digunakan pada batang utama, kecuali pada kaki sepanjang 2.5 in pada profil L atau sayap dari suatu profil dimana dibutuhkan baut dengan ukuran dimensi sebesar 0.625 in untuk memenuhi ketentuan detailing yang lain.

Profil L yang ukurannya tidak ditentukan dengan perhitungan kebutuhan bisa menggunakan :

- Jika panjang kaki profil Siku 2 in , maka menggunakan baut diameter 0.625 in
- Jika panjang kaki profil Siku 2.5 in , maka menggunakan baut diameter 0.75 in
- Jika panjang kaki profil Siku 3.0 in , maka menggunakan baut diameter 0.875 in
- Jika panjang kaki profil Siku 3.5 in , maka menggunakan baut diameter 1.0 in

Diameter dari baut profil siku untuk batang utama sebaiknya tidak melebihi $\frac{1}{4}$ leba dari kaki yang mana baut itu dipasang.

2.3.2.3 Jarak Antar Baut

❖ Spasi minimum dan clear distance

Pada AASHTO LRFD pasal 6.13.2.6.1 dispesifikasikan bahwa spasi minimum antar titik tengah dari baut pada lubang standar sebaiknya tidak kurang dari 3 kali diameter baut. Ketika lubang oversize dan lubang berslot digunakan, clear distance atau jarak spasi antara bagian tepi baut baik yang searah dengan gaya maupun transversal dengan gaya, sebaiknya tidak boleh kurang dari 2 kali diameter baut.

❖ Spasi maksimum untuk Sealing Bolts

Untuk menyegel dari penetrasi kelembaban pada joint, spasi pada baut segaris yang berdekatan dengan tepi pada pelat luar atau shape harus memenuhi persamaan sebagai berikut ;

$$s \leq (4.0 + 4.0t) \leq 7.0 \quad 2. 63$$

Jika ada baut baris kedua yang staggered secara seragam dengan baut yang berdekatan dengan tepi bebas ternyata kurang dari $1.5+4.0t$, spasi dari baut staggered, S, harus memenuhi persamaan sebagai berikut ;

$$s \leq 4.0 + 4.0t - \left(\frac{3.0g}{4.0}\right) \leq 7.0 \quad 2. 64$$

Spasi pada baut staggered harus tidak kurang dari $\frac{1}{2}$ yang disyaratkan untuk single line

Dimana :

t = Tebal dari pelat paling atau shape yang paling tipis (in.)

g = jarak ukur antar baut (in.)

❖ Jarak Baut Keujung Balok

Jarak baut ke ujung batang untuk semua tipe lubang diukur dari tengah baut sebaiknya tidak kurang dari jarak tepi yang telah dispesifikasikan pada **tabel** . Apabila lubang *oversize* dan lubang berslot digunakan, *clear end distance* sebaiknya tidak kurang dari lebar diameter.

Tabel 2. 29 Jarak tepi minimum.

No.	Diameter Baut (mm)	Jarak Tepi Minimum
1	16	22
2	20	26
3	22	28

4	24	30
5	27	34
6	30	38
7	36	46
8	Diatas 36	1,25 d

(Sumber : AASHTO LRFD Bridge Design and Spesification)

Jarak ujung maksimum atau *maximum end distance* adalah jarak tepi maksimum seperti yang dispesifikasikan pada pasal 6.13.2.6.6.

❖ Jarak Baut Ketepi Balok

Menurut AASHTO LRFD pasal 6.13.2.6.6 jarak tepi minimum sebaiknya seperti yang dispesifikasikan di **tabel** . Jarak tepi maksimum sebaiknya tidak lebih dari 8 kali ketebalan dari pelat bagian luar yang paling tipis atau 5.0 in.

2.3.2.4 Resistensi Terhadap Geser / Shear Resistance

Pada AASHTO LRFD pasal 6.13.2.7 dijelaskan bahwa resistensi geser nominal dari high- strength bolt (ASTM F3125) atau baut ASTM A307 (Grade A atau B) pada keadaan batas kekuatan di joun yang panjang antara baut ekstrem diukur parallel dengan garis aksi gaya adalah kurang dari 38 in, harus diambil sebagai:

- Dimana Thread tidak menjadi bagian bidang geser

$$R_n = 0.56 A_b F_{ub} N_s \quad 2. 65$$

- Dimana thread menjadi bagian bidang geser

$$R_n = 0.45 A_b F_{ub} N_s \quad 2. 66$$

Dimana :

A_b = Luas Baut (in²)

F_{ub} = Kuat tarik minimum baut yang dispesifikasikan dipasal 6.4.3 (ksi)

N_s = Jumlah bidang geser pada baut

Resistensi geser nominal baut pada sambungan traik lap-splice panjangnya lebih besar dari 38.0 in sebaiknya diambil sebagai 0.83 kali nilai yang dihasilkan dari rumus diatas.

Jika thread dari baut dikutsertakan pada bidang geser di joint, resistensi geser baut di semua bidang geser pada joint sebaiknya dinilai untuk theard yang diikutsertakan di bidang geser.

Untuk baut ASTM A307 , desain geser harus didasarkan pada persamaan kedua. Ketika panjang grip pada baut ASTM A307 melebihi 5 kali diameter, resistensi nominal harus direndahkan 1 % pada setiap 1/16 in .

2.3.2.6 Tahanan Bantalan / Bearing Pada Lubang Baut

Luas bearing efektif dari sebuah baut sebaiknya diambil sebagai diambur dikalikan dengan dengan ketebalan dari material yang terkoneksi pada bantalan atau bearing tersebut. Ketebalan efektif dari matrial yang terkoneksi dengan lubang countersunk sebaiknya diambil sebagai ketebalan dari matrial yang terkoneksi, dikurangi ½ tebal dari countersink.

Untuk lubang standar, lubang oversize, lubang dengan slot pendek dibebani di berbagai arah, dan lubang berslot panjang parallel dengan gaya bearing yang diterapkan, resistensi nominal dari interior dan lubang baut ujung pada keadaan batas kekuatan , R_n , Sebaiknya diambil sebagai :

- Jarak bersih/ clear distance antar lubang baut dan jarak lubang baut dengan tepi tidak kurang dari 2.0d

$$R_n = 2.4 dtF_u \quad 2.68$$

- Jika baik clear distance lubang baut maupun jarak lubang baut dengan tepi kurang dari 2.0d ;

$$R_n = 1.2 L_c t F_u \quad 2.69$$

Untuk lubang berslot panjang tegak lurus dengan gaya bearing yang diterapkan:

- Jarak bersih/ clear distance antar lubang baut dan jarak lubang baut dengan tepi tidak kurang dari 2.0d ;

$$R_n = 1.2 L_c t F_u \quad 2.70$$

- Jika baik clear distance lubang baut maupun jarak lubang baut dengan tepi kurang dari $2.0d$

$$R_n = 1.2 L_c t F_u$$

2. 71

Dimana :

D = luas dari baut (in)

t = Tebal dari matrial yang terkoneksi (in).

F_u = Kuat tarik dari matrial yang terkoneksi dispesifikasikan di **tabel**.

L_c = Clear distance antar lubang atau antara lubang dengan ujung batang di arah dari gaya bearing yang diterapkan.

Tabel 2.3. 1 Mutu matrial

Penamaan AASHTO	M270M/ M 270 Grade 36	M270M/ M 270 Grade 50	M270M/ M 270 Grade 50s	M270M/ M 270 Grade 50w	M270M/ M 270 Grade HPS 50W	M270M/ M 270 Grade HPS 70W	M270M/ M 270 Grade HPS 100 W	
Penamaan di ASTM	A709/ A709M Grade 36	A709/ A709M Grade 50	A709/ A709M Grade 50s	A709/ A709M Grade 50w	A709/ A709M Grade HPS 50W	A709/ A709M Grade HPS 70W	A709/ A709M Grade HPS 100 W	
Tebal pelat (in)	sampai 4,0 in	sampai 4,0 in	tidak berlaku	sampai 4,0 in	sampai 4,0 in	sampai 4,0 in	sampai 2,5 in	2,5 sampai 4,0
bentuk	semua group	semua group	semua group	semua group	N/A	N/A	N/A	N/A
kuat tarik minimum, F_u (ksi)	58	65	65	70	70	85	110	100
Tegangan leleh minimum, F_y, (ksi)	36	50	50	50	50	70	100	90

(Sumber : AASHTO LRFD Bridge Design and Spesification)

2.3.2.7 Ketahanan Terhadap Tarik

Menurut AASHTO LRFD pasal 6.13.2.10 baut high-strength mengalami gaya aksial harus ditarik pada gaya yang dispesifikasi pada tabel diatas. Gaya tarik yang diterapkan sebaiknya diambil sebagai gaya akibat beban berfaktor eksternal, ditambah setiap tarik dihasilkan dari aksi mencongkel / prying action yang dihasilkan oleh deformasi dari bagian yang tersambung, seperti yang dispesifikasikan pada AASHTO LRFD pasal 6.13.2.10.4.

2.3.2.8 Ketahanan Tarik Normal

Resistensi/ketahanan tarik nominal dari sebuah baut, T_n , bebas dari segala gaya pengetat awal / tightening force harus diambil sebagai :

$$T_n = 0.76 A_b F_{ub} \quad 2.72$$

Dimana :

A_b = luas dari baut (in)

F_{ub} = kuat tarik minimum dari baut yang dispesifikasikan di Tabel 2.3.
1 (Ksi)

2.3.3. Gaya Geser Nominal

Pada AASHTO LRFD pasal 6.10.10.4.2 dijelaskan bahwa untuk bentang sederhana dan untuk bentang menerus dimana pada kondisi akhir adalah non-komposit untuk lentur negative. Total gaya geser nominal, P , antara titik beban hidup desain positif maksimum ditambah impact momen dan setiap point yang berdekatan dari momen nol harus diambil sebagai ;

$$P = \sqrt{P_p^2 + F_p^2} \quad 2.81$$

Dimana :

P_p = gaya longitudinal pada deck beton pada point dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen (kip) diambil yang terkecil dari ;

$$p_{1p} = 0.85 f_c b_s t_s \quad 2.82$$

Atau

$$p_{2p} = F_{yw} D t_w + F_{yt} b_{ft} t_{ft} + F_{yc} b_{fc} t_{fc} \quad 2.83$$

Dimana:

F_p = total gaya radial di deck beton pada titik dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen (kip) diambil sebagai :

$$F_p = \frac{P}{R} \frac{L_p}{R} \quad 2.84$$

Dimana :

b_s = lebar efektif dari deck beton (in.)

L_p = panjang arch antara ujung girder dengan titik yang berdekatan dengan beban hidup positif maksimum ditambah impact momen (ft)

R = jari-jari minimum girder sepanjang panjang jembatan, L_p (ft)

t_s = ketebalan deck beton (in.)

untuk jembatan bentang lurus atau segmental, F_p bisa diambil sama dengan nol.

Untuk span menrus yang komposit untuk lentur negative pada kondisi akhir, total gaya geser nominal, P , antara titik dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen dan dekat dengan ujung batang harus ditentukan dari persamaan dibawah. Total gaya geser nominal, P , antara titik dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen dan titik tengah dari *support interior* harus diambil sebagai :

$$P = \sqrt{P_T^2 + F_T^2} \quad 2.85$$

Dimana :

P_T = gaya longitudinal total pada deck beton antara titik dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen dan canterkine dari *support interior* yang berdekatan (kip) diambil sebagai :

$$P_T = P_p + P_n \quad 2.86$$

P_n = gaya longitudinal total pada deck beton diatas support / tumpuan interior (kip) , diambil nilai yang lebih kecil dari :

$$P_{1n} = F_{yw}Dt_w + F_{yt}b_{ft}t_{ft} + F_{yc}b_{fc}t_{fc} \quad 2.87$$

Atau

$$P_{2n} = 0.45f_b s t_s \quad 2.88$$

F_T = gaya radial total du deck beton antara antara titik dari beban hidup positif maksimum ditambah impact momen dan canterlinedari support interior yang berdekatan (kip) diambil sebagai :

$$F_T = P_T \frac{L_n}{R} \quad 2.89$$

Dimana :

L_n = panjang arch antara ujung girder dengan titik yang berdekatan dengan beban hidup positif maksimum ditambahn impact momen (ft)

R = jari-jari minnum girder sepanjang panjang jembatan , L_p (ft)

2.3.4. Tahanan Geser Nominal

Tahanan geser nominal dari suatu shear connector yang tertanam pada deck beton harus diambil sebagai :

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_cE_c} \leq A_{sc}F_u \quad 2.90$$

Dimana :

A_{sc} = luas potongan melintang shear connector tipe *stud* (in)

E_c = modulus elastisitas dari deck beton ditentukan berdasarkan spesifikasi dari pasal AASHTO LRFD Pasal 5.4.2.4 (ksi)

F_u = tegangan ultimit minimum dari shear connector tipe stud yang dupesifikasikan di pasal 6.4.4

Tahanan geser nominal dari suatu *shear connector* tipe kanal tertanam di deck beton harus diambil sebagai :

$$Q_n = 0.4(t_f + 0.5t_w)L_c\sqrt{f'_cE_c} \quad 2.91$$

Dimana :

t_f = ketebalan flens dari *shear connector* tipe kanal (in)

t_w = ketebalan web dari *shear connector* tipe kanal (in)

L_c = panjang dari *shear connector* tipe kanal (in)

2.4 Perhitungan Camber

Pemberian camber pada jembatan harus direncanakan sejak awal desain jembatan. Dalam penentuan tinggi camber umumnya didasarkan pada nilai lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja diatas jembatan. Pemberian camber pada jembatan tidak hanya akan berpengaruh terhadap nilai lendutan yang terjadi, namun juga pada perilaku jembatan. Jembatan baja pada umumnya, memiliki elemen penyusun yang cukup tipis, sehingga pemberian camber akan memiliki pengaruh yang yata pada performa jembatan.pada jembatan rangka baja, semakin tinggi camber yang diberikan, elemen penyusun rangka baja juga menjadi semakin panjang, sehingga elemen batang tersebut menurun kekuatannya dan semakin tekuk.

Kriteria deformasi pada jembatan box girder baja yang memiliki jalur kendaraan dan tempat pejalan kaki yang berada pada kantilever adalah $L/375$ (AASHTO, 2012, pasal 2.5.2.6.2). dengan ketentuan persamaan sebagai berikut:

$$W = \Sigma Q \times \phi / n \quad 2.92$$

$$P = \Sigma P \times \phi / n \quad 2.93$$

$$\Delta = \frac{5 \times W \times L^4}{384 \times E \times I_k} + \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I_k} \quad 2.94$$

Keterangan:

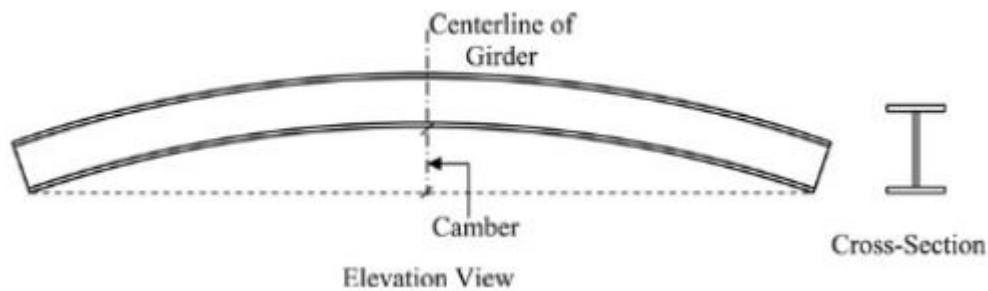
Δ = Lendutan (Defleksi) pada tengah jembatan

W = Beban yang bekerja pada jembatan (termasuk beban mati dan beban hidup)

L = Panjang bentang jembatan

E = Modulus elastisitas baja

I = Momen inersia dari penampang box girder



Gambar 2.3 Tinggi camber pada jembatan