

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Jembatan

Jembatan berfungsi sebagai penghubung dua wilayah yang terhalang oleh adanya suatu rintangan yang dapat berupa lembah, sungai, danau, irigasi, jalan kereta, jalan raya yang melintang tidak sebidang dan sebagainya, sehingga dapat memberikan kemajuan pada perekonomian, budaya, transportasi, dan lainnya (Tim IBM Direktorat PKP, 2022)

Kemajuan zaman dan juga teknologi, membuat tipe, fungsi, lokasi, dan bahan konstruksi jembatan mengalami perkembangan. Pada kehidupan dizaman sebelum masehi, gambaran jembatan yang alamiah terbuat dari bahan seperti pohon dan batuan alam, zaman romawi kuno sudah mulai membangun jembatan menggunakan material kayu, batu, dan beton dengan bentuk pelengkung dan dizaman tersebut sudah berhasil mengatasi permasalahan-permasalahan yang cukup rumit. Sedangkan dizaman pertengahan, jembatan menggunakan tipe pelengkung kurva ellips dengan pilar segitiga, selanjutnya jembatan berkembang menjadi besi dan baja, jembatan gantung, *cable-stayed*, beton bertulang dan, beton prategang (Supriyadi & Muntohar, 2007). Perkembangan setiap zaman mengalami kemajuan, sehingga jembatan dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Menurut Kegunaan
 - a. Jembatan jalan raya/*highway bridge*
 - b. Jembatan kereta api/*railway bridge*
 - c. Jembatan pejalan kaki/*foot path*
 - d. Jembatan penyeberangan
 - e. Jembatan jalan pipa
 - f. Jembatan jalan air
2. Menurut Material
 - a. Jembatan kayu
 - b. Jembatan baja
 - c. Jembatan beton bertulang dan beton pratekan

- d. Jembatan komposit
3. Menurut Sistem Struktur
- a. Jembatan tumpuan sederhana/*simply supported bridge*
 - b. Jembatan menerus/*continuous bridge*
 - c. Jembatan kantilever/*cantilever bridge*
 - d. Jembatan semi-integral/*semi-integral bridge*
 - e. Jembatan integral/*integral bridge*
 - f. Jembatan rangka/*truss bridge*
 - g. Jembatan pelengkung tiga sendi/*arch bridge*
 - h. Jembatan gantung/*suspension bridge*
 - i. Jembatan kabel/*cable-stayed bridge*
 - j. Jembatan urung-urung/*culverts bridge*

Perencanaan geometrik jembatan disesuaikan dengan kebutuhan, perkiraan ramainya kendaraan yang melintas dapat menentukan klas jembatan. Menurut Direktorat Jendral Bina Marga (1997) klasifikasi jembatan permanen terbagi tiga, disajikan dalam tabel dibawah.

Tabel 2.1 Klasifikasi Klas Jembatan

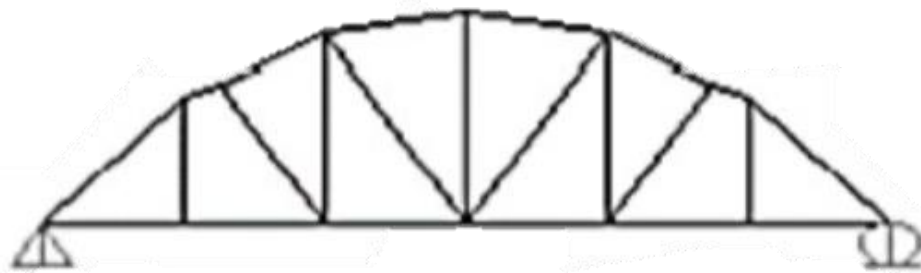
Klas Jembatan	Lebar Total (m)	Lebar Trotoar (m)	Lebar badan jalan (m)	Jumlah Lajur	Beban Lalin
Klas A	9 m	2 x 1 m	7 m	2 Lajur	BM – 100
Klas B	7 m	2 x 0,5 m	6 m	2 Lajur	BM – 100
Klas C	4,5 m	2 x 0,5 m	3,5 m	1 Lajur	BM – 70

2.2 Jembatan Pelengkung Rangka Baja

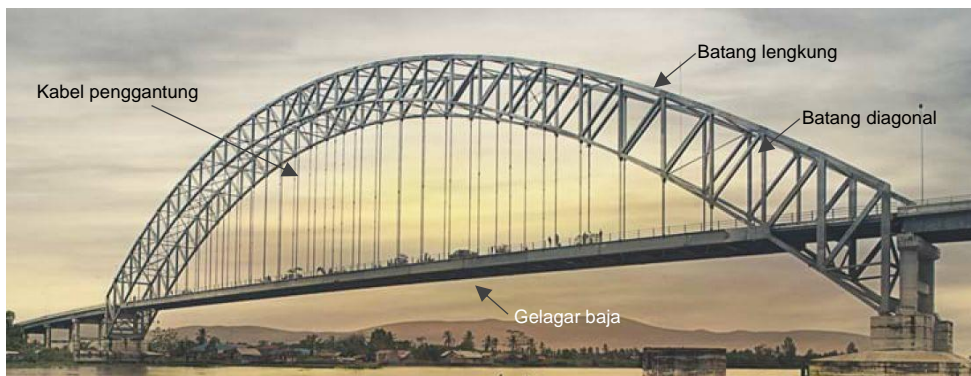
Jembatan rangka baja merupakan struktur dengan material baja berupa batang-batang yang dihubungkan setiap ujungnya dengan sendi/pin, dimana batang-batang tersebut menerima beban yang dipikul kemudian disalurkan pada *joint*/titik buhul, sehingga gaya dalam pada rangka batang adalah gaya aksial dan gaya geser, sedangkan gaya momen bernilai nol (Sukarman, 2022).

Pemilihan konfigurasi jembatan pelengkung rangka baja disesuaikan dengan kebutuhan, dan biasanya yang menjadi pertimbangan yakni bentang dari jembatan yang akan dibangun. Jembatan pelengkung rangka baja menjadi pilihan dalam

perencanaan ulang pada tugas akhir ini, selain berdasarkan penjelasan pada latar belakang, jembatan pelengkung memiliki bentang capaian hingga 500 m (Kementerian PUPR, 2021), selain itu juga jembatan tipe pelengkung memiliki estetika yang dapat dinikmati pengguna. Dipilih material baja, karena memiliki kekuatan, kekakuan dan daktilitas yang lebih unggul dibanding beton, dengan rasio kuat dibanding beratnya 5,1 – 7,0 sedangkan beton 0,9 (Badan Standarisasi Nasional, 2016a)– 2,3 (Dewobroto, 2016), sehingga bahannya yang ringan dapat mencapai bentang yang lebih panjang.



Gambar 2.1 Jembatan Rangka Baja Tipe Parker
(Sumber: Sukarman, 2022)



Gambar 2.2 Jembatan Pelengkung dengan *Hanger* Kabel
(Sumber: <https://kalsel.antaranews.com/berita/132508/adaro-tindaklanjuti-ambruknya-fender-jembatan-rumpiang>, 9 Desember 2023)

2.3 Struktur Utama Atas Jembatan Pelengkung

Menilik dari namanya jelas sekali bahwa tipe pelengkung memiliki fisik berbentuk kurva yang berarti sifat transfer bebannya pun membentuk kurva, dan biasa digunakan pada bentang panjang. Jembatan pelengkung memiliki dua konfigurasi kurva, yaitu pelengkung atas dan pelengkung bawah, dengan perbedaan

pada jalur penyebaran beban dari lantai kendaraan ke pelengkung yang akhirnya ditumpu oleh abutment, yaitu (Sukarman, 2022):

1. Pelengkung atas menyebarkan beban melalui *hanger*.
2. Pelengkung bawah menyebarkan beban melalui kolom.

Dari kedua konfigurasi tersebut dan dikorelasikan dengan teori berdasarkan Pedoman tentang Perancangan Jembatan Pelengkung Menteri PUPR No. 02/SE/M/2018 terdapat lima tipe jembatan, yang salah satunya yaitu *Through True Arch* tipe ini memiliki batang lengkung cenderung lebih besar di atas lantai kendaraan dengan transfer beban melalui *hanger*, dimana lantai kendaraan menggunakan sistem penyangga *hanger*. Tipe pelengkung dipilih berdasarkan geometrik lokasi yang akan dibangun jembatan, karena pada perencanaan ini lokasi tidak terjal, maka digunakan tipe *through arch*.



Gambar 2.3 Tipe *Through True Arch*
(Sumber: Kementerian PUPR, 2021)

2.3.1 Lantai Kendaraan

Umumnya, pelat lantai kendaraan adalah tipe pelat satu arah, yaitu tulangan utama arah tegak lurus jalan, sedangkan arah memanjang hanya menggunakan tulangan susut dan suhu/bagi sebagai pengaku tulangan utama dan menahan retak beton akibat susut dan suhu. Analisis struktur meliputi momen lentur dan geser pada lantai akibat beban truk.

2.3.2 Batang lengkung/*arch*

Batang utama penting karena memiliki peran dalam menerima beban paling besar yang ditransfer dari *hanger*. Gaya yang terjadi pada batang lengkung adalah gaya tekan, sehingga timbal baliknya yaitu dengan menggunakan material dengan kuat tekan yang tinggi (Sukarman, 2022). Untuk mendapatkan dimensi jembatan busur, dihitung geometri busur dengan metode *trial and error* (A. Hool & W.S. Kinne, 1943 dalam Hakikie & Wahyuni, 2017), dengan syarat:

1. Tinggi lengkung

$$\frac{1}{6} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{5} \dots\dots\dots(2.1)$$

2. Tinggi tampang busur

$$\frac{1}{40} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{25} \dots\dots\dots(2.2)$$

3. Panjang segmen busur

$$s \leq \frac{1}{15} L \dots\dots\dots(2.3)$$

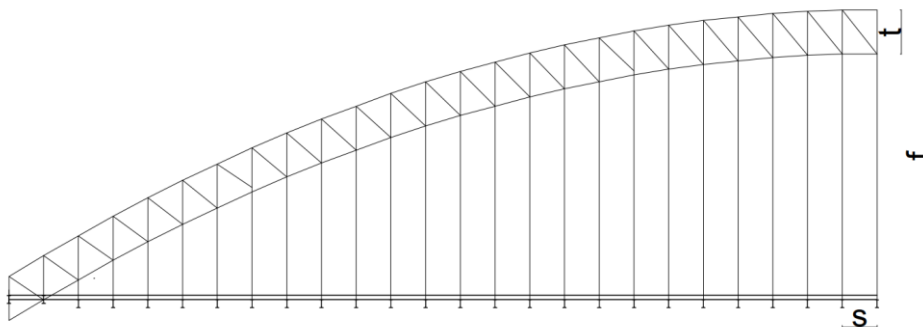
Keterangan:

f adalah tinggi lengkung (m)

t adalah tinggi tampang busur (m)

L adalah panjang busur/jembatan (m)

s adalah panjang segmen lengkung (m)



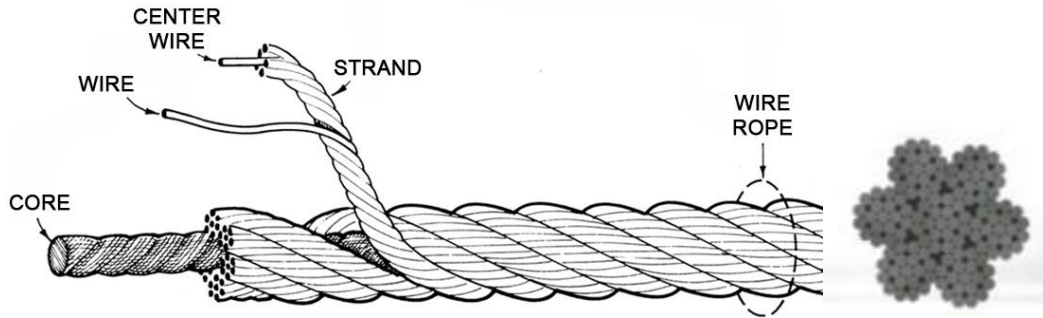
Gambar 2.4 Dimensi Jembatan

2.3.3 Sistem Penyangga

Sistem penyangga terbagi menjadi dua, yaitu kolom dan *hanger*. *Hanger* memiliki fungsi yang sama yaitu sebagai penyalur beban dari lantai kendaraan ke batang lengkung, dapat dibuat vertikal atau diagonal, terbuat dari profil baja berupa *bar*, *strand*, atau pendel yang dihubungkan dengan angkur prategang dengan perilakunya adalah tarik.

Pada tugas akhir ini, *hanger* menggunakan jenis *stainless strand cables* atau kawat baja atau *wire rope* spesifikasi dari ASTM A416/A416M (American Standard Testing and Material, 2015). Kabel ini terdiri dari beberapa bagian yaitu *wire* adalah helai-helai kawat yang terbuat dari baja, kemudian *wire* tersebut dipilin

dan itu disebut *strand* sehingga membentuk kabel yang kuat, dan *core* yang merupakan bagian inti kawat baja. Berikut lebih jelas bagian-bagian *strand cables* yang dilansir dari <https://www.atlantissling.com/understand-the-steel-wire-rope-terms-> (6 Februari 2020) & *Macalloy Brochure*:



Gambar 2.5 Bagian-Bagian *Strand Cabels*

Panjang *hanger* yang diperlukan pada setiap segmen, dengan mengaplikasikan persamaan parabola:

$$Y_n = \frac{4 \cdot f_e \cdot x \cdot (L-x)}{L^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

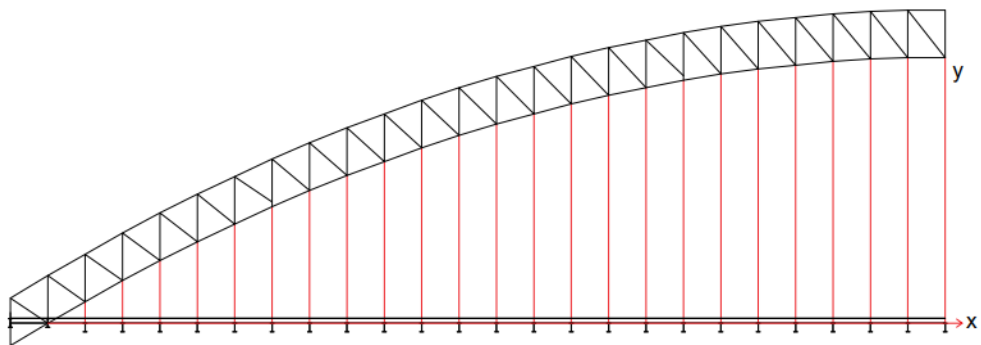
Keterangan:

x adalah jarak persegmen untuk tinggi yang akan ditinjau (m)

Y_n adalah tinggi *hanger* (m)

f_e adalah tinggi efektif busur ($f - t$) (m)

L adalah panjang bentang efektif (m)



Gambar 2.6 Panjang *Hanger*

2.3.4 Gelagar memanjang

Pada tugas akhir ini, konfigurasi gelagar memanjang didesain menopang pada gelagar melintang. Gelagar (*girder*) memanjang merupakan penampang searah jembatan yang berfungsi menopang segala beban dari pelat lantai dan menyalurkannya ke gelagar melintang, sehingga direncanakan sebagai balok lentur (kondisi sebelum komposit). Karena itu, gelagar memanjang didesain sebagai balok komposit karena menumpu pelat lantai dengan sambungan *shear connector*.

2.3.5 Gelagar melintang

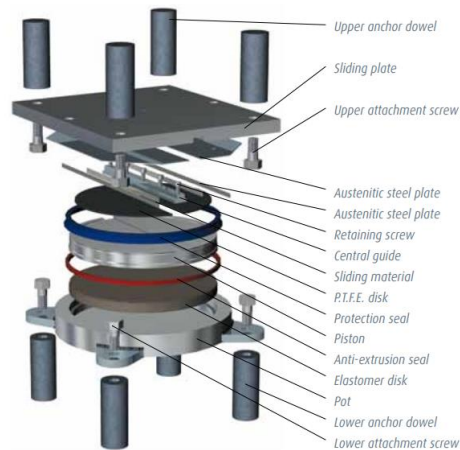
Gelagar (*girder*) melintang berfungsi sebagai penerima beban dari gelagar memanjang dan disalurkan kepada sistem penyangga, sehingga direncanakan sebagai balok lentur.

2.3.6 Ikatan Lateral

Ikatan lateral (ikatan angin) merupakan rangka yang terdapat diantara dan menyatukan batang lengkung (rangka utama) sisi kanan dan kiri, dapat berupa rangka vertikal, diagonal, dan/atau horizontal. Rangka ini berfungsi sebagai penahan gaya lateral, menghasilkan gaya aksial tekan ataupun tarik.

2.3.7 Perletakan/Tumpuan

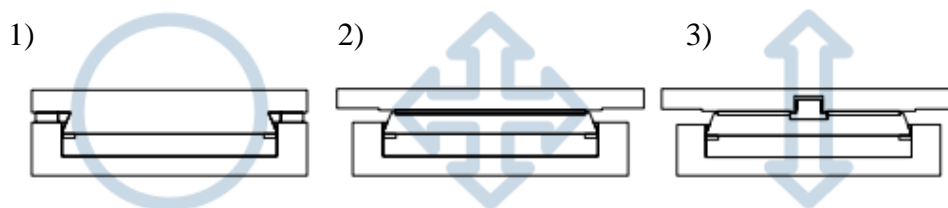
Perletakan merupakan sistem tumpuan jembatan yang memiliki fungsi untuk memikul seluruh beban dari atas jembatan yang akan disalurkan ke fondasi, salah satunya adalah *pot bearing*. *Pot bearing* adalah perletakan yang terdiri dari piston baja yang didukung oleh lempeng elastomer yang tipis (Kementerian PUPR, 2018), struktur *pot bearing* dapat menerima beban yang cukup besar, seperti gambar dibawah menunjukkan struktur dan arah *pot bearing* dilansir dari *Tetron Brochure*.



Gambar 2.7 Struktur *Pot Bearing*

Arah yang dapat diakomodir *pot bearing* yaitu:

1. *Fixed*, memungkinkan tidak adanya gerakan.
2. *Multidirectional*, memiliki sifat dapat menerima gaya vertikal dan horizontal.
3. *Free Pot*, memiliki sifat dapat menerima vertikal namun tidak dapat menerima gaya horizontal.



Gambar 2.8 Arah Pergerakan *Pot Bearing*

2.4 Struktur Sekunder Atas Jembatan

Pada tugas akhir ini, direncanakan struktur sekunder pada jembatan yang bersangkutan sebagai berikut:

2.4.1 Sandaran

Ada beberapa elemen sandaran, dan diasumsikan menahan lentur, meliputi:

1. *Raill post*/tiang sandaran merupakan tiang penyangga yang berada di tepi jembatan dan sebagai perletakan dari pipa sandaran. Material yang digunakan pada desain ini menggunakan material baja.

2. *Hand rail*/pipa sandaran merupakan bagian sandaran yang berada diantara tiang-tiang sandaran atau dapat dikatakan penghubung tiang-tiang sandaran. Pipa sandaran pada desain ini dipilih dari pipa baja.

2.4.2 Trotoar

Trotoar berfungsi sebagai fasilitas yang berada di tepi jembatan untuk para pejalan kaki sekaligus sebagai balok penguat pelat lantai kendaraan. Trotoar direncanakan sebagai pelat beton bertulang yang bertumpu pada pelat lantai kendaraan di tepi jembatan. Panjang trotoar disesuaikan dengan panjang jembatan yang direncanakan, sedangkan lebarnya disesuaikan dengan kelas jembatan.


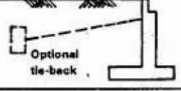
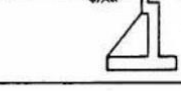
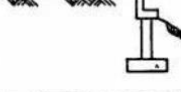

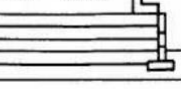
2.5 Struktur Bawah Jembatan

Struktur bawah jembatan pada tugas akhir ini, meliputi *abutment* dan fondasi tiang, tanpa adanya pilar.

2.5.1 Kepala Jembatan/*Abutment*

Prinsipnya, *abutment* menerima gaya dorong yang ditransfer dari pelengkung, sehingga diperlukan *abutment* yang kuat untuk menopang seluruh beban yang diterimanya.

Adapun jenis *abutment* menurut Bridge Management System tahun 1992 berdasarkan cara pengadaan peralihannya, meliputi pangkal tembok penahan, pangkal kolom *spill-through*, dan pangkal tanah bertulang. Pada penelitian ini akan menggunakan pangkal tanah bertulang yang merupakan sistem paten yang memperkuat timbunan agar menjadi bagian *abutment*, memanfaatkan gravitasi tanah yang digunakan penahan gaya aktif tanahnya, atau pada

JENIS PANGKAL	TINGGI PANGKAL (m)			
	0	10	20	30
PANGKAL TEMBOK PENAHAN GRAVITAS 	3	4		
PANGKAL TEMBOK PENAHAN KANTILEVER 	8			
PANGKAL TEMBOK PENAHAN KONTRAFORT 	6	8		
PANGKAL KOLOM 'SPILL-THROUGH' 				
PANGKAL BALOK CAP TIANG SEDERHANA 				
PANGKAL TANAH BERTULANG 	5	15		

Gambar 2.9 Jenis Abutment menurut BMS 1992

(Sumber: Kementerian PUPR, 1992)

Pada perencanaan *abutment* harus menentukan:

1. Letak *abutment*, berdasarkan bentuk penampang sungai, MAB, jenis aliran sungai, dan statigrafi tanah.
2. Bentuk *abutment*, yang ditentukan berdasarkan bentang, jenis sungai, dan material yang digunakan.
3. Tinggi *abutment*, ditentukan berdasarkan *clearance*/tinggi dari MAB ke jembatan.
4. Ukuran *abutment*, yang ditentukan berdasarkan tinggi *abutment*.

Abutment harus didesain agar stabil terhadap gaya geser dan guling akibat tanah aktif, dengan persamaan:

1. Syarat aman terhadap geser

$$SF = \frac{\sum V \cdot \tan \frac{2}{3} \phi + c \cdot B}{\sum H} \geq 1,5 - 2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

V adalah beban aksial dari atas yang kontak dengan *abutment* (kN)

Φ adalah faktor lekatan atau hambatan antara tanah dan fondasi ($^{\circ}$)

c adalah karakteristik adhesi antara tanah dengan *abutment* (kN/m^2)

B adalah lebar dimensi fondasi di atas tanah (m)

H adalah gaya horizontal tekanan tanah (m)

2. Syarat aman terhadap guling

$$SF = \frac{\Sigma Mp}{\Sigma Mg} \geq 2 \text{ (untuk tanah kohesif) (2.6)}$$

$$SF = \frac{\Sigma Mp}{\Sigma Mg} \geq 1,5 \text{ (untuk tanah non-kohesif) (2.7)}$$

dimana,

$$\Sigma Mp = V. \text{ lengan momen } (p) \text{ (2.8)}$$

$$\Sigma Mg = H. \text{ lengan momen } (g) \text{ (2.9)}$$

Keterangan:

Mp adalah momen yang melawan penggulingan (kNm)

Mg adalah momen yang mengakibatkan penggulingan (kNm)

Daya dukung tanah dihitung dengan:

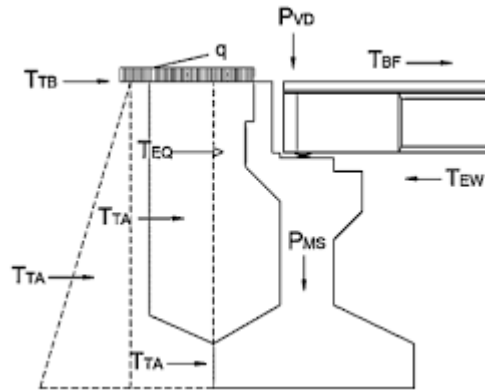
$$Q = \frac{Q_{ult}}{Q_{max}} \geq 3 \text{ (2.10)}$$

Tegangan yang terjadi pada tanah dasar *abutment* dihitung:

$$\sigma = \frac{\Sigma V}{B.L} - \left(1 \pm \frac{6.e}{B}\right) \text{ (2.11)}$$

$$\text{Syarat, } \sigma_m \leq Q_{ult} \text{ (2.12)}$$

Gaya-gaya yang akan terjadi pada *abutment* jembatan tugas akhir ini diilustrasikan:



Gambar 2.10 Gaya yang Terjadi pada *Abutment*
(Sumber: Tri dkk., 2021)

2.5.2 Fondasi Tiang

Fondasi merupakan salah satu sistem struktur yang terakhir dalam memikul keseluruhan beban dan disebarkan ke tanah. Fondasi dapat dibagi dua, yaitu fondasi dangkal (*shallow foundations*) untuk kedalaman ≤ 3 m dan fondasi dalam (*deep foundations*) untuk kedalaman > 3 m. Pemilihan jenis fondasi dipertimbangkan berdasarkan beban yang dipikul, kondisi tanah, dan biaya (Christady, 2014).

Fondasi tiang pancang digunakan untuk lapisan tanah keras terletak sangat dalam, mendukung bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, dan untuk bangunan dermaga (Christady, 2015). Fondasi tiang pancang digunakan untuk beberapa hal, yaitu untuk:

1. Meneruskan beban bangunan yang terletak diatas air atau tanah lunak, ke tanah pendukung yang kuat.
2. Meneruskan beban ke tanah yang relatif lunak hingga kedalaman tertentu.
3. Memperkuat bangunan yang dipengaruhi oleh gaya angkat ke atas akibat tekanan hidrostatis atau momen penggulingan.
4. Menahan gaya-gaya horizontal dan gaya yang arahnya miring.
5. Memadatkan tanah pasir, sehingga kapasitas dukung tanah tersebut bertambah.
6. Mendukung fondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air.

Dalam pemilihan fondasi yang cocok, perlu mempertimbangkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Keadaan tanah dasar fondasi.
2. Batasan akibat struktur atas.
3. Batasan dari lingkungan sekitar.
4. Waktu dan biaya pengerjaan.

Perancangan fondasi harus memperhitungkan kapasitas dukung tiang tunggal terlebih dulu, yang artinya kemampuan tiang dalam memikul beban. Terdapat dua tinjauan kapasitas dukung yang umumnya dipakai untuk mendapatkan kapasitas dukung *ultimate*, menurut Mayerhof (1956) yaitu:

Tahanan ujung (*end bearing capacity*), dengan persamaan:

$$Q_{btang} = 4 \cdot A_{ptiang} \cdot N_P \dots\dots\dots (2.13)$$

Catatan:

Nilai N_P yang dipakai untuk menentukan daya dukung tiang, sebaiknya diambil rata-rata dari N-SPT pada kedalaman 6D s.d. 10D di atas ujung bawah tiang, dan 2D s.d. 4D di bawah ujung bawah tiang

Tahanan selimut (*friction capacity*), terdapat:

1. Tiang perpindahan besar, yaitu jika tiang saat dipancang akan memindahkan volume tanah dengan jumlah yang besar, yang umumnya berbentuk pejal atau tertutup

$$Q_{Stiang} = \frac{A_{stiang} + \bar{N}}{50} \dots\dots\dots (2.14)$$

2. Tiang perpindahan kecil, dapat meninggikan tanah dengan skala kecil, dan tiang tanpa penutup

$$Q_{Stiang} = \frac{A_{stiang} + \bar{N}}{100} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dari kedua perhitungan kapasitas dukung per masing-masing tahanan tersebut, akan didapat kapasitas dukung tanah *ultimate*, yaitu:

$$Q_u = Q_b + Q_s \dots\dots\dots (2.16)$$

Sedangkan kapasitas dukung izin tanah, dihitung:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana,

Safety factor sebesar 2,5 s.d. 4

Beban bersih yang akan diterima tiang, dihitung dengan persamaan:

$$Q_{tiang} = Q_{all} - W_{tiang} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dikarenakan kapasitas dukung memakai kombinasi dari tahanan ujung dan selimut, maka perlu kontrol kekuatan bahan tiang jika mendapatkan beban, dengan persamaan:

$$P_{tiang} = \sigma_{bahan} \cdot A_{tiang} \dots \dots \dots (2.19)$$

Keterangan:

P_{tiang} adalah kekuatan yang diizinkan pada tiang pancang (kg)

σ_{bahan} adalah tegangan izin bahan tiang (kg/cm²)

tegangan izin untuk material beton (0,25 s.d. 0,33). $f'c$

A_{tiang} luas penampang ujung tiang pancang (cm²)

Beban neto izin tersebut harus dapat dipikul oleh tiang, sehingga:

$$Q_{tiang} < P_{tiang} \dots \dots \dots (2.20)$$

Fondasi ini akan didesain sebagai kelompok tiang yang disatukan dengan *pile cap*, sehingga perlu dihitung kebutuhan kelompok tiang, dengan persamaan:

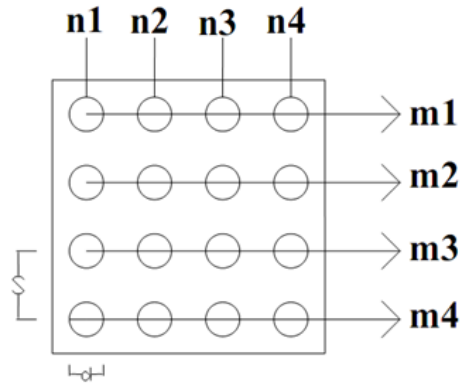
$$N_p = \frac{\text{beban izin}}{q_{tiang}} \dots \dots \dots (2.21)$$

Untuk membentuk sebuah kelompok tiang yang efektif, disyaratkan spasi antar tiang:

$$2,5d \leq S \leq 3d \dots \dots \dots (2.22)$$

S = (Asumsi). D

Tata letak fondasi tiang diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2.11 Jarak dan Tata Letak Fondasi Tiang

Perlu ada koreksi akibat adanya tumpang tindih garis-garis tegangan dari masing-masing tiang yang berdekatan, dan pengaruh tersebut dinyatakan dalam suatu angka yang dinamakan efisiensi kelompok tiang, dengan persamaan:

$$E_g = 1 - \frac{\theta}{90} \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{m \cdot n} \right] \dots\dots\dots (2.23)$$

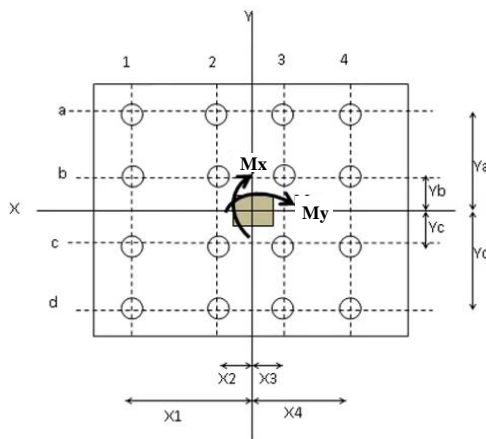
dimana,

$$\theta = \text{arc. tan. } d/S \dots\dots\dots (2.24)$$

Kontrol daya dukung per tiang dan beban maksimum yang diterima tiang:

$$Q_{tk} = E_g \cdot n \cdot Q_{tiang} > P = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y \cdot y}{\Sigma y^2} \pm \frac{M_x \cdot x}{\Sigma x^2} \dots\dots\dots (2.25)$$

Gaya-gaya yang akan bekerja pada fondasi tiang diilustrasikan:



Gambar 2.12 Gaya yang Terjadi pada Fondasi Tiang

Keterangan:

$Q_{b_{tiang}}$ adalah daya dukung ujung tiang (kN)

$A_{p_{tiang}}$ adalah luas penampang ujung tiang pancang (m²)

N_P adalah nilai N-SPT disekitar ujung tiang

D adalah diameter tiang (m^2)

Q_{Stiang} adalah daya dukung friksi tiang (kN)

A_{Stiang} adalah luas selimut dinding tiang (m^2)

\bar{N} adalah nilai N-SPT rata-rata di sepanjang tiang

P_{tiang} adalah kekuatan yang diizinkan pada tiang pancang (m^2)

σ_{bahan} adalah tegangan izin bahan tiang (beton: $0,25 - 0,33 \cdot f'c$) (kN/m^2)

A_{tiang} luas penampang ujung tiang pancang (m^2)

Q_{tiang} beban netto atau daya dukung tiang tunggal (kN)

s adalah spasi atau jarak antar sumbu tiang (m)

E_g adalah efisiensi kelompok tiang

m adalah jumlah baris tiang

n adalah jumlah tiang dalam satu baris

W adalah berat tiang tunggal (kN)

2.6 Pembebanan

Perencanaan pembebanan pada tugas akhir ini, mengacu pada SNI 1725:2016 tentang *Pembebanan untuk Jembatan*, dan SNI 2833:2018 tentang *Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa*. Perencanaan pembebanannya meliputi:

2.6.1 Beban Permanen

Massa dari setiap elemen dihitung dari dimensi yang direncanakan dan nilai berat jenis sesuai dengan bahan yang digunakan. Nilai-nilai berat jenis berdasarkan bahan, tertera pada tabel di bawah berdasar dari SNI 1725:2016 butir 7.1.

Tabel 2.2 Berat Isi untuk Beban Mati

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>Compact Sand, Silt or Clay</i>)	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan (<i>Rolled Gravel, Macadam or Ballast</i>)	18,8 – 22,7	1920 – 2315
5	Beton Aspal (<i>Asphalt Concrete</i>)	22,0	2245
6	Beton Ringan (<i>Low Density</i>)	12,15 – 19,6	1250 – 2000

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (kg/m ³)
7	Beton $f'_c < 35$ Mpa	22,0 – 25,0	2320
	$35 < f'_c < 105$ 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
10	Kayu Keras (<i>Hard Wood</i>)	11,0	1125

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a

2.6.1.1 Beban Sendiri (MS)

Beban sendiri termasuk kedalam beban permanen yang merupakan berat bahan, berat dari bagian elemen struktural jembatan seperti gelagar dan pelat lantai, elemen non struktural yang dianggap tetap seperti ikatan angin, yang kemudian dikalikan dengan faktor beban sesuai kebutuhan dan bahan yang digunakan berdasarkan SNI 1725:2016 butir 7.2.

Tabel 2.3 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimate (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, 2016a

2.6.1.2 Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Beban mati tambahan adalah berat dari keseluruhan bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan seperti kerb; lapisan aspal; *railing* & trotoar (dijelaskan pada poin *TC* dan *TP*), yang dikalikan dengan faktor beban berdasarkan SNI 1725:2016 Butir 7.3.

Tabel 2.4 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

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

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

Sumber: *Badan Standarisasi Nasional, 2016a*

Dipakai lapisan aus dengan minimum ketebalan 40 mm berdasarkan pada Spesifikasi Umum Pekerjaan Jalan dan Jembatan Modul 7 tahun 2016 Tabel 6.3.1.(1). Ketebalan yang diizinkan untuk pelapisan kembali dikemudian hari permukaan aspal beton setebal 50 mm, dan semua jembatan harus direncanakan untuk bisa memikul beban tambahan tersebut.

2.6.2 Beban Lalu Lintas

2.6.2.1 Beban Lajur “D” (*TD*)

Bedasarkan pada SNI 1725:2016 butir 8.3, beban lajur “D” yang merupakan beban yang bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan sehingga beban “D” menimbulkan pengaruh diibaratkan pada jembatan yang ekuivalen dengan iring-iringan kendaraan.

Secara umum, beban “D” akan menjadi penentu dalam perhitungan jembatan yang mempunyai bentang sedang hingga menengah, dengan kata lain beban yang bekerja pada jembatan bentang sedang hingga panjang adalah kemungkinan beban lajur “D”. Beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi rata (BTR) dan beban garis (BGT).

1. Intensitas beban “D”

- a. Beban terbagi rata (BTR), mempunyai intensitas q kPa dengan nilai q tergantung pada panjang total yang dibebani (L), yaitu:

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m, maka } q = 9,0 \text{ kPa} \dots\dots\dots (2.26)$$

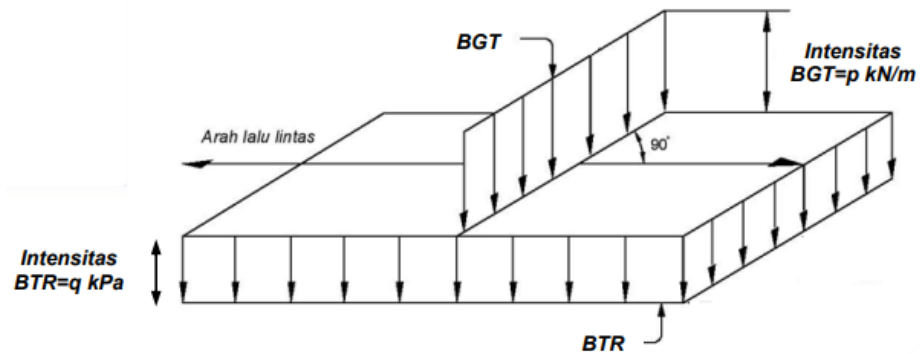
$$\text{Jika } L > 30 \text{ m, maka } q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan:

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

L adalah panjang total jembatan yang dibebani (m).

- b. Beban garis terpusat (BGT), intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan, dengan nilai p adalah 49,0 kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.



Gambar 2.13 Beban Lajur “D”

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a)

Table 2.1 Faktor Beban untuk Beban “D”

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^S)	Keadaan Batas <i>Ultimate</i> (γ_{TD}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a

2.6.2.2 Beban Truk “T” (TT)

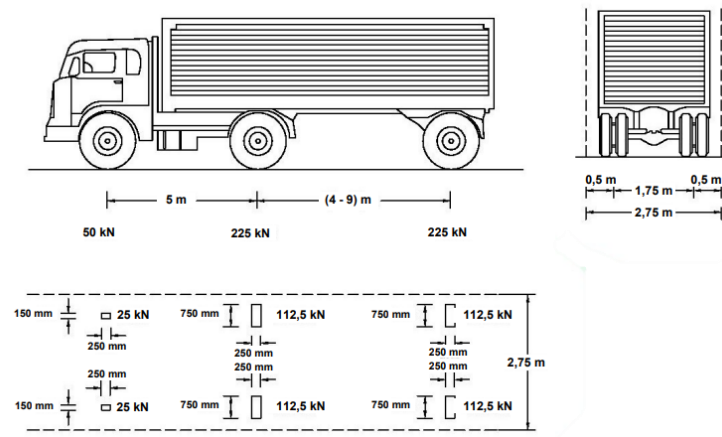
Berdasarkan pada Sumber: SNI 1725:2016 Butir 8.4 beban truk “T” yang merupakan beban satu kendaraan berat dengan 3 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana, atau dengan kata lain jembatan diasumsikan menerima beban truk yang sedang melintas, dan tiap gandar terdiri atas dua bidang kontak pembebanan yang dimaksudkan sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat pada saat menghitung beban pada pelat lantai. Hanya satu truk “T” diterapkan per lajur lalu lintas rencana, dengan kata lain dalam satu lajur tidak dapat diasumsikan beberapa truk.

Beban truk “T” digunakan untuk jembatan bentang panjang, dan tidak bisa digunakan bersamaan dengan beban “D”. Dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai.

Tabel 2.5 Faktor Beban untuk Beban “T”

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TT})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^S)	Keadaan Batas <i>Ultimate</i> (γ_{TT}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a



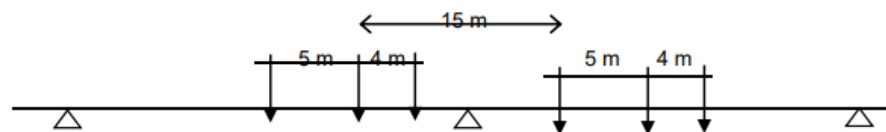
Gambar 2.14 Pembebanan Truk “T” (500 kN)

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a)

Berat dari tiap-tiap gandar disebarakan menjadi dua beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai, dan jarak antara dua gandar tersebut dapat diubah-ubah dari 4,0 m sampai 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.

1. Posisi dan penyebaran pembebanan truk “T” dalam arah melintang, untuk jembatan sangat panjang dapat di tempatkan lebih dari satu truk pada satu lajur lalu lintas rencana.
2. Bidang kontak roda yang terdiri atas satu atau dua roda, diasumsikan mempunyai bentuk persegi panjang dengan panjang 750 mm dan lebar 250 mm, dan tekanan ban harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan bidang kontak.

- Penerapan beban hidup dihitung, untuk menentukan momen positif yang diambil dari nilai terbesar diantara pengaruh beban truk dikalikan dengan faktor beban dinamis (FBD), dengan pengaruh beban terdistribusi “D” dan beban garis KEL dikalikan FBD. Untuk momen negatif, beban truk di tempatkan pada dua bentang yang berdampingan dengan gandar truk terhadap gandar depan truk dibelakangnya adalah 15 m, dengan jarak antara gandar tengah dan gandar belakang adalah 4 m.

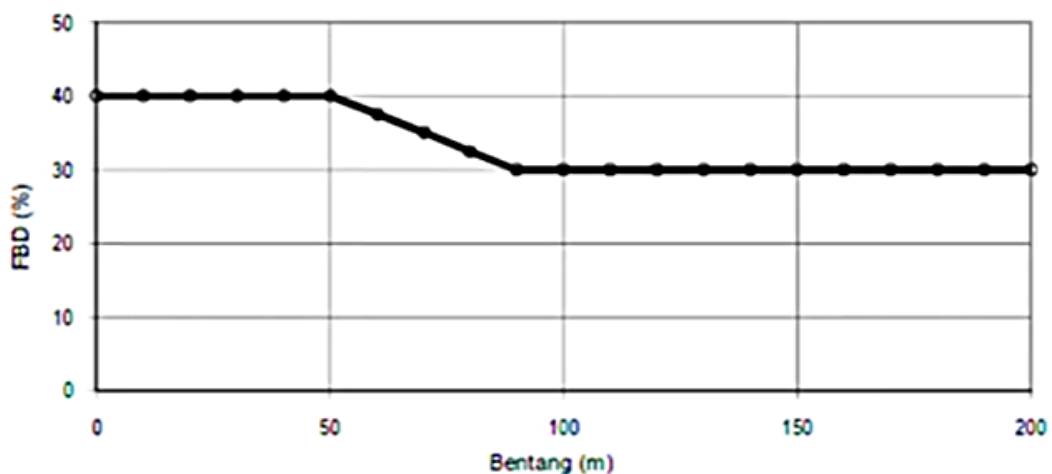


Gambar 2.15 Penempatan Beban Truk

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a)

2.6.2.3 Faktor Beban Dinamis

Ketika jembatan bergetar karena adanya kendaraan yang melintas, maka getaran menyebabkan efek tambahan pada jembatan yang dinamakan faktor beban dinamis. Faktor beban dinamis tidak diperhitungkan pada gaya rem, gaya sentrifugal, beban pejalan kaki, beban terbagi rata (BTR), namun hanya digunakan pada beban garis terbagi rata (BGT) dan beban roda dari pembebanan truk “T”. Nilai faktor beban dinamis untuk pembebanan truk “T” diambil 30%, sedangkan untuk pembebanan lajur “D” digunakan grafik seperti dibawah.



Gambar 2.16 Faktor Beban Dinamis untuk untuk Pembebanan Lajur “D”

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a)

2.6.2.4 Gaya Rem (*TB*)

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari dua kemungkinan, diantara 25% dari berat gandar truk desain, dengan 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR). Pada tugas akhir ini, gaya rem dihitung untuk perencanaan struktur bawah, karena untuk hitungan struktur atas dihitung beban yang paling menentukan.

2.6.2.5 Beban Pejalan Kaki (*TP*)

Untuk trotoar yang memiliki lebar dari 600 mm harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa, dan dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan. Namun, jika trotoar dapat dinaiki maka beban pejalan kaki tidak perlu dianggap bekerja sama dengan beban kendaraan.

2.6.2.6 Beban Akibat Tumbukan Kendaraan (*TC*)

Beban tumbukan kendaraan diperhitungkan pada perencanaan *railing* atau sandaran, seperti yang disebutkan pada SNI 1725:2016 pasal 11 menyebutkan bahwa sandaran berfungsi untuk memberikan keamanan pada pengguna jalan, seluruh pengaman lalu lintas secara struktur dan geometrik harus tahan terhadap benturan kendaraan. Pengaman lalu lintas ditentukan berdasar pada asumsi kinerja yang terdapat pada SNI 1725:2016 pasal 11.1 dan disesuaikan dengan tabel 33.

2.6.3 Aksi Lingkungan

2.6.3.1 Beban Angin (*EW*)

Tekanan angin diasumsikan yang disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam. Beban angin harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Luas area yang diperhitungkan adalah luas area dari semua komponen, termasuk sistem lantai dan *railing* yang diambil tegak lurus terhadap arah angin. Dalam kasus ini, elemen yang terkena angin adalah rangka utama, gelagar, pelat lantai, dan *railing*.

Beban angin dapat terjadi pada struktur atas dan bawah, dan juga beban angin pada kendaraan.

1. Beban angin pada struktur atas (EW_s), dapat digunakan persamaan berikut:

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \dots\dots\dots (2.28)$$

Pada hasil perhitungannya, gaya total beban angin tidak boleh diambil < 4,4 N/mm pada bidang tekan, dan 2,2 N/mm pada bidang hisap untuk struktur rangka dan pelengkung, serta < 4,4 N/mm pada balok atau gelagar.

Keterangan:

P_B adalah tekanan angin dasar seperti yang tertera pada tabel di bawah (Mpa).

Tabel 2.6 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, 2016a

V_D adalah kecepatan angin rencana pada elevasi rencana, Z (km/jam).

V_B adalah kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm, yang akan menghasilkan tekanan.

2. Gaya angin yang langsung bekerja pada struktur bawah, tekanan angin dasar sebesar 0,0019 MPa.
3. Gaya angin pada kendaraan (EW_l), diasumsikan tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, bekerja tegak lurus dan bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan.

2.6.3.2 Beban Gempa (EQ)

Perhitungan pengaruh gempa terhadap jembatan termasuk beban gempa, cara analisis, peta gempa, dan detail struktur, mengacu pada (Badan Standarisasi Nasional, 2016b) SNI 2833:2008 yang telah diperbaharui menjadi SNI 2833:2016 tentang *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan*.

Catatan: peta gempa mengalami pembaharuan menjadi peta gempa tahun 2017.

2.6.4 Aksi-aksi Lainnya

2.6.4.1 Gesekan Pada Perletakan (BF)

Berdasarkan pada SNI 1725:2016 butir 10.1 pengaruh pada perletakan yang mempunyai kekakuan geser pada elastomer, dengan hasil seberapa besar kekuatan geser dari elastomer akibat beban gesekan.

Tabel 2.7 Faktor Beban Akibat Gesekan pada Perletakan

Jangka Waktu	Faktor Beban (γ_{BF})		
	Keadaan Batas Layan (γ_{BF}^S)	Keadaan Batas <i>Ultimate</i> (γ_{BF}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Trasiyen	1,0	1,3	0,8

Catatan ⁽¹⁾: Gaya akibat gesekan pada perletakan terjadiselama adanya pergerakan pada bangunan atas, tetapi gaya sisa mungkin terjadi setelah pergerakan berhenti. Dalam hal ini, gesekan pada perletakan harus memperhitungkan adanya pengaruh tetap yang cukup besar.

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a

2.6.5 Faktor Beban dan Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan dipilih berdasarkan kondisi beban pada perencanaan. Uraian keadaan batas kombinasi pembebanan terdapat pada butir 6.1 SNI 1725-2016. Berikut faktor beban dan kombinasi beban Tabel 1:

Table 2.2 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EWs	EWL	BF	EUn	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
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}	-	-	-

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EWs	EWL	BF	EUn	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
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	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a

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

2.7 Batang Tarik

Batang tarik merupakan batang yang direncanakan dengan asumsi menerima beban tarik searah sumbu batang yang berarti menerima gaya aksial. Batang tarik pada penelitian ini mengacu pada (Badan Standarisasi Nasional, 2020) SNI 1729:2020.

Batang tarik dapat terdiri dari batang tunggal atau *double*, dengan variasi yang umum digunakan yaitu bentuk profil bulat, pelat, siku, *double* siku, kanal, *double* kanal, WF. Struktur rangka baja pada jembatan, umumnya menggunakan profil WF atau kanal (Setiawan, 2008).

2.7.1 Perilaku dan Tahanan Nominal Tarik

Perilaku batang saat dibebani oleh beban tarik hingga terjadi runtuh terdapat dua kemungkinan umum dan harus dikontrol terhadap kemungkinan tersebut dalam menentukan tahanan nominal, yaitu:

1. Pada batang

- a. Kondisi leleh terjadi pada bagian penampang yang tidak memiliki lubang serta jauh dari sambungan (penampang bruto)

$$\phi P_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_y \dots \dots \dots (2.29)$$

- b. Kondisi putus/sobek/*fracture* terjadi pada bagian penampang memiliki lubang (penampang netto) atau pada daerah sambungan, keruntuhan karena tegangan yang terjadi

$$\phi P_n = 0,75 \cdot A_e \cdot f_u \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\text{dimana, } A_e = U \cdot A_n \dots\dots\dots (2.31)$$

(Dikali U , jika pelat tidak disambung seluruhnya)

2. Pada sambungan (dibahas pada poin sambungan)

- a. Baut putus
- b. Pelat sobek/kegagalan tumpu
- c. *Block shear*

Berdasarkan konsep nilai kondisi yang minimum akan lebih dahulu terjadi dari pada nilai kondisi maksimum, maka dari kedua kondisi pilih nilai yang minimum untuk asumsi kuat tarik.

Dengan syarat:

$$\phi P_n > P_u \dots\dots\dots (2.32)$$

Keterangan:

A_g adalah luas kotor penampang (m²)

A_e adalah luas efektif penampang (m²)

A_n adalah luas bersih (m²)

U adalah faktor koreksi akibat *shear-lag* (apabila tidak seluruh pelat yang disambungkan) dibahas pada poin 2.7.3

f_u adalah kuat tarik profil baja (MPa)

n adalah jumlah baut di lintasan putus

Keruntuhan *fracture* baiknya dihindari karena lebih berbahaya, sehingga faktor reduksinya lebih kecil.

2.7.2 Luas Penampang dan Diameter Baut

Luas penampang A_g merupakan luasan penampang utuh untuk perhitungan pada penampang jauh dari lubang baut. Luas penampang A_n yang diperhitungkan pada kuat aksi tarik nominal digunakan pada perhitungan kegagalan pada sambungan yang dan tergantung pada konfigurasi lubang baut, dan jika pada

sambungan las $A_g = A_n$ (Dewobroto, 2016). Terdapat dua kemungkinan luas penampang yang diperhitungkan, yaitu jika:

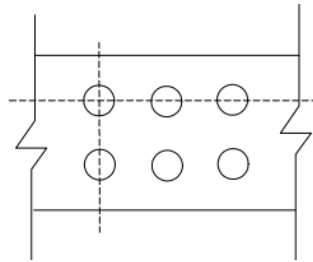
1. Pola baut segaris

$$A_n = A_g - n \cdot d \cdot t \dots\dots\dots(2.33)$$

Keterangan:

d adalah diameter lubang (m)

t adalah tebal penampang yang mengalami putus (m)



Gambar 2.17 Tata Letak Baut Segaris

2. Pola baut tidak segaris (*staggered*)

Pola baut tidak segaris atau kata lain pola zig-zag dapat dipilih jika jumlah baut banyak, sehingga ditempat yang sama dapat memuat lebih banyak baut. Luasan penampang neto untu lubang sambungan zig-zag:

$$A_n = A_g - n \cdot d \cdot t + \sum \frac{s^2 \cdot t}{4 \cdot g} \dots\dots\dots(2.34)$$

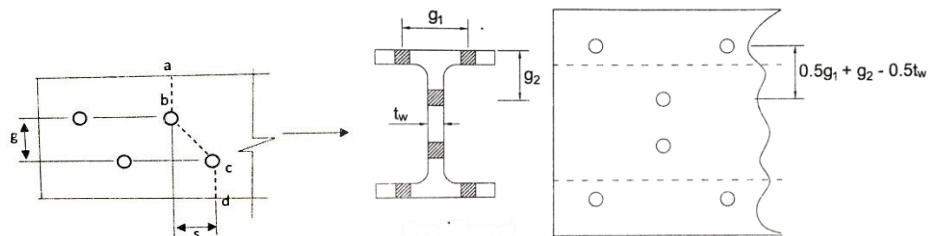
Keterangan:

d adalah diameter lubang (m)

t adalah tebal penampang yang mengalami putus (m)

s adalah jarak antar baut dalam arah sejajar gaya (m)

g adalah jarak antar baut dalam arah tegak lurus gaya (m)



Gambar 2.18 Tata Letak Baut Tak Segaris

(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

Untuk menghindari risiko pelemahan akibat pembuatan lubang pada saat fabrikasi, maka diameter baut ditambah 1/16 in atau 2 mm lebih besar dari diameter lubang nominal (diameter lubang real terpasang) yang terdapat pada SNI 1729:2020 tabel J3.3, dan untuk perhitungan luas penampang neto, dipakai diameter lubang imajiner yaitu d (nominal) + 1/16 in untuk satuan SI sebesar 2 mm.

2.7.3 Fenomena *Shear Lag*

Salah satu fenomena yang dapat mempengaruhi kinerja suatu batang tarik adalah *shear lag* (U) yang menjadi salah satu parameter pada perhitungan A_n , merupakan fenomena saat suatu profil hanya disambung sebagian atau tidak sepenuhnya sambungan, contohnya saat profil siku disambung pada salah satu sisinya saja, yang akan menimbulkan beban berlebih pada sisi yang disambung, karena tidak adanya keseimbangan tegangan yang terjadi pada sisi bebas sehingga nilai *shear lag* menjadi maksimum ($U < 1$). Namun jika seluruh penampang tersambung, maka *shear lag* menjadi minimum atau bisa diabaikan ($U \approx 1$). Faktor *shear lag* dalam hal ini merupakan faktor reduksi untuk memperhitungkan kondisi tersebut.

Besar kecilnya faktor *shear lag* yang akan diperhitungkan tergantung pada konfigurasi penampang. Faktor *shear lag* secara empiris tersaji pada SNI 1729:2020 tabel D3.1 yang terdapat berbagai konfigurasi penampang.

2.8 Batang Tekan

Batang tekan merupakan batang yang menerima beban tekan yang searah dengan sumbu batang yang berarti menerima gaya aksial, tidak mengalami momen maupun gaya lintang, dan tegangannya disebut tegangan tekan. Penampang yang digunakan sebagai elemen tekan umumnya sama dengan elemen tarik.

2.8.1 Parameter Batang Tekan dan Faktor Panjang Efektif

Material (f_y), geometrik penampang yang terdiri dari luas penampang (A), inersia penampang (I), dan panjang batang dengan kondisi tumpuan atau panjang efektif (L_c), atau L_c/r merupakan rasio kelangsingan yang menjadi parameter penting pada perencanaan batang tekan, yang mana $r = \sqrt{I/A}$.

Panjang efektif kolom merupakan jarak antar ujung-ujung tumpuan. Nilai panjang efektif atau panjang tekuk (L_c) tergantung pada jenis tumpuan atau perletakan pada kolom. Panjang efektif dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$L_c = K \cdot L \dots \dots \dots (2.35)$$

Keterangan:

K adalah faktor panjang efektif

L adalah pajang batang

K pada kolom dapat dilihat pada gambar 2.19, diambil contoh panjang efektif bernilai 2.0 pada jenis tumpuan (f) yang artinya panjang simpangan yang terjadi 2 kali lebih panjang dari panjang kolom sebenarnya.

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
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code	<ul style="list-style-type: none"> Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free 					

Gambar 2.19 Faktor Panjang Efektif

(Sumber: American National Standard, 2019)

2.8.2 Perilaku dan Tahanan Nominal Tekan

Untuk dapat menganalisis penampang sebagai batang tekan, penampang didefinisikan mengalami tekuk. Batang tekan harus didesain agar tidak mengalami tekuk, dengan memperhitungkan kuat tekan nominal:

$$\phi P_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_{cr} \dots \dots \dots (2.36)$$

Dengan syarat:

$$\phi P_n > P_u \dots \dots \dots (2.37)$$

Tekuk yang terjadi pada batang tekan dapat berupa:

2.8.2.1 Tekuk Lokal

Tekuk lokal merupakan penampang terlalu tipis dan terjadi hanya dibagian tertentu saja (sayap atau badan), maka ada kemungkinan terjadinya tekuk lokal.

Analisis tekuk lokal dapat digolongkan menjadi elemen langsing dan non langsing yang ditentukan oleh lebar-tebal (b/t) penampang dan nilainya diperoleh dari Tabel B4.1a pada SNI 1729:2020, dengan mengikuti syarat:

Jika, $\lambda > \lambda_r$ maka dikategorikan penampang langsing

Jika, $\lambda < \lambda_r$ maka dikategorikan penampang non langsing

Hasil analisis penampang langsing non-langsing dipakai untuk menentukan rumusan pada analisis tekuk global, yang didapat pada Tabel E1.1 pada SNI 1729:2020.

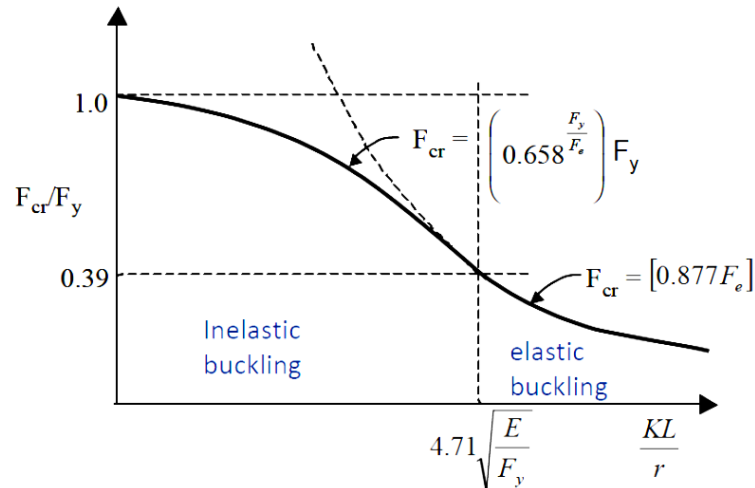
2.8.2.2 Tekuk global

Tekuk global merupakan tekuk secara memanjang, dipengaruhi oleh rasio kelangsingan batang (L_c/r_{min}). Tekuk global memungkinkan terjadinya tiga kegagalan yaitu:

1. Tekuk lentur/*flexural buckling*, yaitu tekuk yang mengakibatkan terlentur/defleksi terhadap sumbu lemah. Semua profil baja memungkinkan untuk terjadi tekuk lentur.
2. Tekuk torsi/*torsional buckling*, yaitu tekuk yang mengakibatkan penampang berputar sepanjang longitudinal batang.
3. Tekuk torsi-lentur/*flexural-torsional buckling*, perpaduan dari tekuk lentur dan torsi yaitu batang yang mengalami tekan akan melentur dan berputar secara bersamaan.

Analisis tekuk global pada batang tekan dapat berupa inelastis ataupun elastis yang dipengaruhi oleh rasio kelangsingan batang, dengan persamaan $\frac{L_c}{r}$, dimana L_c

terdapat pada persamaan 2.34 dan dibandingkan dengan persamaan $4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, sehingga persamaan tegangan kritis tergantung pada nilai yang didapat. Untuk lebih jelasnya lihat gambar 2.23.



Gambar 2.20 Kurva Kelangsingan Batang Tekan
(Sumber: Program Studi Teknik Sipil, 2021)

Dimana,

$$\text{Untuk tekuk lentur } f_e = \frac{\pi^2 E}{(K.L/r)^2} \dots\dots\dots (2.38)$$

Untuk tekuk torsi dan torsi-lentur:

$$\text{simetris ganda } f_e = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L)^2} + GJ \right) \frac{1}{I_x + I_y} \dots\dots\dots (2.39)$$

$$\text{simetris tunggal } f_e = \left(\frac{F_e y + F_e z}{2H} \right) \left[1 - \frac{4 \cdot F_e y \cdot F_e z \cdot H}{(F_e y + F_e z)} \right] \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan:

$$H \text{ adalah konstanta lentur dengan persamaan } 1 - \frac{X_o^2 + Y_o^2}{\bar{r}_o^2} \dots\dots\dots (2.41)$$

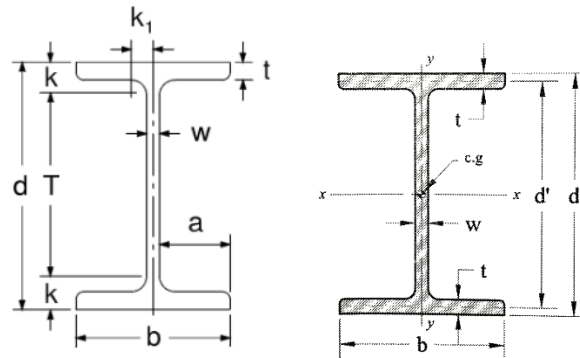
$$\bar{r}_o^2 \text{ adalah radius girasi polar dipusat geser } X_o^2 + Y_o^2 \frac{I_x + I_y}{A_g} \dots\dots\dots (2.42)$$

G adalah modulus elastisitas geser baja = 77200 MPa

$$J \text{ adalah konstanta torsi profil WF } = \frac{2 \cdot b \cdot t^3 + d \cdot w^3}{3} \text{ (mm}^4\text{)} \dots\dots\dots (2.43)$$

$$C_w \text{ adalah konstanta pilin profil WF } = \frac{d'^2}{4} \cdot I_y \text{ (mm}^6\text{)} \dots\dots\dots (2.44)$$

X_o, Y_o adalah koordinat pusat geser yang dinyatakan dengan titik berat (mm)



Gambar 2.21 Nomenkelatur Profil WF dan Parameter Rumus

(Sumber: <https://syont.wordpress.com/2016/07/08/karakteristik-torsi-penampang-dgn-dan-tanpa-radius-takikan/>, 8 Juli 2016 & Dewobroto, 2016)

2.9 Balok Lentur

Kombinasi tekan dan tarik yaitu sisi atas mengalami tekan dan sisi bawah mengalami tarik, terjadi akibat balok lentur menerima gaya yang tegak lurus dengan batang. Berbeda dengan batang tarik dan batang tekan yang keduanya menerima gaya aksial. Momen dan geser diterima oleh balok lentur, maka harus diperhitungkan terhadap kedua gaya tersebut, dengan syarat:

$$\phi M_n \geq M_u \dots \dots \dots (2.45)$$

$$\phi V_n \geq V_u \dots \dots \dots (2.46)$$

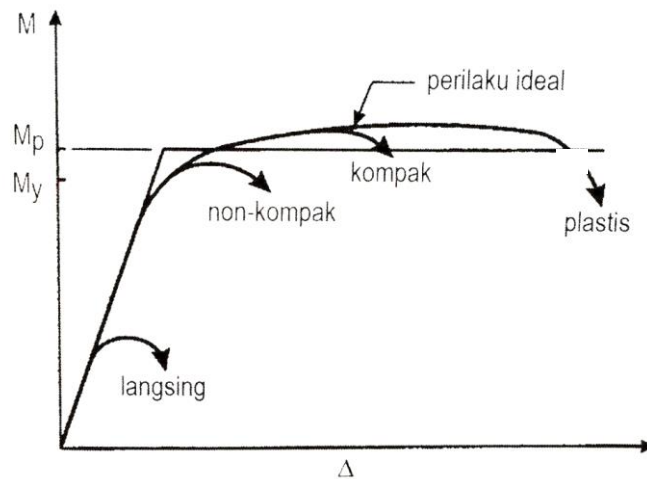
Analisis balok lentur diklasifikasikan menjadi tiga yaitu penampang kompak, nonkompak, atau elemen langsing dan dilakukan kontrol pada sayap dan badan. Syarat perilaku balok lentur:

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

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

$\lambda > \lambda_r$ maka dikategorikan penampang langsing

Penentuan klasifikasi balok lentur ditentukan dengan rasio tebal terhadap lebar elemen sayap dan badan sesuai bentuk profil baja. Pada (Badan Standarisasi Nasional, 2002) SNI 03-1729-2020 batasan rasio tebal-lebar terdapat pada tabel B4.1b.



Gambar 2.22 Kurva Karakteristik Penampang
(Sumber: Dewobroto, 2016)

Pola kegagalan yang mungkin terjadi pada balok lentur dapat berupa tekuk lokal, tekuk torsi lateral, atau plastis sempurna.

Pada poin ini disinggung profil non-kompak, untukantisipasi jika profil *hot-rolled* tidak memenuhi syarat dan tidak tersedia profil yang memenuhi untuk kondisi batas, maka dibuat profil *built-up*.

2.9.1 Lateral torsional buckling (LTB)/Tekuk Torsi Lateral

LTB adalah ketika sebuah balok dibebani, kemudian balok terguling karena adanya beban tekan yang menyebabkan bagian atas tertekuk kearah sumbu lemah. Alternatif untuk menghindari *LTB* yang selaras dengan penelitian ini dengan memberikan *shear connector* dan diafragma, ilustrasi pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Pola Kegagalan *Lateral Torsional Buckling (LTB)*
(Sumber:

https://www.youtube.com/watch?v=bcIrDoL6WSA&ab_channel=ThinkUp, 2015)

Berdasarkan SNI 1729:2020 terjadi atau tidaknya tekuk lateral tergantung dari panjang bentang antara dua pengekang lateral yang berdekatan (L).

1. $L \leq L_p$, maka tidak akan terjadi tekuk lateral
2. $L_p \leq L \leq L_r$ dan $L \geq L_r$, maka akan terjadi tekuk lateral

Poin kedua akan berpengaruh terhadap kuat nominal penampang

dimana:

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \dots \dots \dots (2.47)$$

$$\text{dimana } r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \dots \dots \dots (2.48)$$

$$L_r = 1,95 r_{ts} \frac{E}{0,7 \cdot f_y} \sqrt{\left(\frac{J \cdot C}{S_x \cdot h_o}\right) + \sqrt{\left(\frac{J \cdot C}{S_x \cdot h_o}\right)^2 + 6,76 \cdot \left(\frac{0,7 \cdot f_y}{E}\right)^2}} \dots \dots \dots (2.49)$$

dimana,

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{(I_y \cdot C_w)^2}{S_x}} \dots \dots \dots (2.50)$$

Keterangan:

E adalah modulus elastisitas baja (MPa)

r_y adalah jari-jari girasi sumbu y (mm)

I_y adalah momen inersia sumbu y (mm⁴)

C_w adalah konstanta *warping* (mm⁶)

J adalah konstanta torsi

S_x adalah modulus elastisitas penampang terhadap sumbu kuat (mm³)

h_o adalah jarak antara titik berat elemen sayap penampang

$C = 1$

L adalah panjang bentang diantara dua pengekang lateral (mm)

2.9.2 Profil WF Kompak

Profil dengan klasifikasi tersebut dihitung untuk leleh (Y) dan tekuk torsi lateral (LTB). Dengan persamaan:

1. Leleh (momen plastis)

$$M_n = M_p = f_y \cdot Z_x \dots \dots \dots (2.51)$$

2. Tekuk torsi-lateral

Profil WF yang kemungkinan terjadi LTB, maka dicek dengan meninjau syarat seperti pada poin 2.52

Jika,

$$L_p \leq L \leq L_r, \text{ maka } M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0,7 \cdot f_y \cdot S_x) \frac{L - L_p}{L_r - L_p} \right] \leq M_p. \quad (2.52)$$

$$L \geq L_r, \text{ maka } M_n = F_{cr} \cdot S_x \dots\dots\dots (2.53)$$

$$L \leq L_p, \text{ maka } M_n = M_p \dots\dots\dots (2.54)$$

Keterangan:

$C_b = 1$, adalah faktor untuk memperhitungkan faktor momen tidak konstan, pada perencanaan momen kritis penyebab LTB bernilai konstan.

$$F_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J_c}{S_x \cdot h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \dots\dots\dots (2.55)$$

$$r_{ts} = b_f / \sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{h \cdot t_w}{b_f \cdot t_f}\right)} \dots\dots\dots (2.56)$$

2.9.3 Profil WF Sayap Non-Kompak Badan Kompak

Berdasarkan tabel F1.1, jika sayap non-kompak sedangkan badan kompak, maka dapat di tentukan keruntuhan yang akan terjadi:

1. Tekuk torsi-lateral (LTB), dengan perhitungan dan persamaan sama seperti poin 2.9.2, namun perlu cek terhadap tekuk lokal pada sayap.
2. Tekuk lokal (FB), sayap kompak dipakai persamaan:

$$M_n = \left[M_p - (M_p - 0,7 \cdot f_y \cdot S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \dots\dots\dots (2.57)$$

dimana:

$$\lambda = \frac{1}{2} \cdot b_f / t_f \dots\dots\dots (2.58)$$

$\lambda_{pf} = \lambda_p$ adalah batas kelangsingan sayap kompak pada tabel B4.1b

$\lambda_{rf} = \lambda_r$ adalah batas kelangsingan sayap non kompak

2.9.4 Profil WF Sayap Kompak Badan & WF Non-Kompak

Persamaan-persamaan untuk kontrol kondisi batas ini berlaku pada profil yang memiliki sayap kompak dengan badan non-kompak, dan profil dengan sayap dan badan non-kompak (keduanya).

Kuat lentur nominal penampang dipilih nilai terkecil dari beberapa kondisi batas yang menentukan kuat lentur balok dan kemudian dibandingkan dengan M_u :

1. Elemen sayap tekan leleh

$$M_n = R_{pc} \cdot M_{yc} = R_{pc} \cdot F_y \cdot S_{xc} \dots \dots \dots (2.59)$$

dimana,

R_{pc} ditentukan dengan syarat jika:

$$\frac{I_{yc}}{I_y} > 0,23 \text{ dan } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw}, \text{ maka } R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \dots \dots \dots (2.60)$$

$$\frac{I_{yc}}{I_y} > 0,23 \text{ dan } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw}, \text{ maka } R_{pc} = \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \dots \dots \dots (2.61)$$

$$\frac{I_{yc}}{I_y} > 0,23, \text{ maka } R_{pc} = 1,0 \dots \dots \dots (2.62)$$

Keterangan:

$$\lambda = h_c/t_w \dots \dots \dots (2.63)$$

h_c adalah dua kali jarak dari titik berat/sumbu netral (c.g) ke muka bagian dalam sayap dikurangi dengan radius sudut

$\lambda_{pw} = \lambda_p$ adalah batas kelangsingan sayap kompak pada tabel B4.1b

$\lambda_{rw} = \lambda_r$ adalah batas kelangsingan sayap non kompak

I_{yc} adalah momen inersia pada sayap tekan terhadap sumbu y (mm⁴)

M_{yc} adalah momen leleh sayap tertekan (Nmm)

2. Tekuk torsi-lateral

Jika $L \leq L_p$, maka kondisi ini tidak perlu diperhitungkan

Jika $L_p \leq L \leq L_r$, maka

$$M_n = C_b \left[R_{pc} \cdot M_{yc} - (R_{pc} \cdot M_{yc} - F_L \cdot S_{xc}) \left(\frac{L - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq R_{pc} \cdot M_{yc} \dots \dots \dots (2.64)$$

Jika $L \geq L_r$, maka

$$M_n = R_{pc} \cdot M_{yc} = R_{pc} \cdot F_y \cdot S_{xc} \dots\dots\dots (2.65)$$

dimana,

$$M_{yc} = F_y \cdot S_{xc} \dots\dots\dots (2.66)$$

$$F_{cr} = \frac{Cb \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{Lb}{rts}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{Jc}{S_x \cdot h_0} \left(\frac{Lb}{rts}\right)^2} \dots\dots\dots (2.67)$$

Jika $\frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0,23$ maka nilai $J = 0$

dimana,

I_{yc} adalah momen inersia sayap tekan terhadap sumbu Y

Dengan besarnya tegangan sayap nominal sebagai batas bawah berlakunya keadaan batas tekuk inelastic (F_L)

$$\text{untuk } S_{xt}/S_{xc} \geq 0,7 \text{ maka } F_L = 0,7 \cdot F_y \dots\dots\dots (2.68)$$

$$\text{untuk } S_{xt}/S_{xc} < 0,7 \text{ maka } F_L = F_y, S_{xt}/S_x \geq 0,5 \cdot F_y \dots\dots\dots (2.69)$$

Jarak pertambahan lateral, L_p untuk kondisi batas leleh

$$L_p = 1,1 \cdot r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.70)$$

Jarak pertambahan lateral, L_r untuk kondisi batas elastis

$$L_r = 1,95 r_{ts}^2 \frac{E}{0,7 \cdot f_y} \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x \cdot h_0}\right) + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x \cdot h_0}\right)^2 + 6,76 \cdot \left(\frac{0,7 \cdot f_y}{E}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.71)$$

$$r_t = \frac{bfc}{\sqrt{12 \left(\frac{h_o}{d} + \frac{1}{6} a_w \cdot \frac{h^2}{h_o d}\right)}} \text{ dimana, } a_w = \frac{hc \cdot tw}{b_{fc} \cdot t_{fc}} \dots\dots\dots (2.72)$$

Keterangan:

h_o adalah jarak antara titik berat elemen sayap (mm)

b_{fc} adalah lebar sayap tekan (mm)

t_{fc} adalah tebal sayap tekan (mm)

3. Tekuk lokal elemen sayap tekan

Kondisi batas yang berlaku untuk sayap non-kompak, dengan:

$$M_n = R_{pc} \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \dots\dots\dots (2.73)$$

Dimana besaran F_L dan R_{pc} sama dengan poin 1 dan 2 pada pembahasan ini.

4. Elemen sayap tarik leleh

Jika $S_{xt} \geq S_{xc}$, maka kondisi ini tidak perlu diterapkan

Jika $S_{xt} < S_{xc}$, maka:

$$M_n = R_{pt} \cdot M_{yt} = R_{pt} \cdot F_y \cdot S_{xt} \dots\dots\dots (2.74)$$

dimana,

$$\frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw}, \text{ maka } R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \dots\dots\dots (2.75)$$

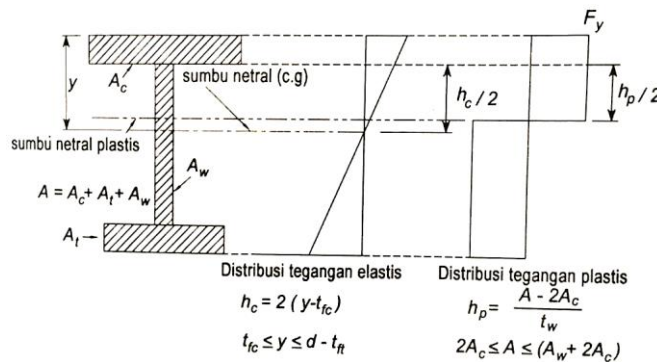
$$\frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw}, \text{ maka } R_{pc} = \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \dots\dots\dots (2.76)$$

Keterangan:

$$S_{xt} = \frac{I_x}{y_t}; S_{xc} = \frac{I_x}{y_c} \dots\dots\dots (2.77)$$

y_t adalah jarak serat tarik terluar ke garis netral

y_c adalah jarak serat tekan terluar ke garis netral



Gambar 2.24 Contoh Notasi yang Diperlukan

(Sumber: Dewobroto, 2016)

2.9.5 Profil Pipa Berongga

Perencanaan profil pipa (bundar) untuk sandaran diasumsikan menahan lentur, dengan rasio:

$$D/t \leq 0,45 \cdot E/f_y \dots\dots\dots (2.78)$$

nilai kuat nominal harus diambil nilai terkecil dari:

1. Leleh

$$M_n = M_p = f_x \cdot Z \dots\dots\dots (2.79)$$

2. Tekuk lokal

Kondisi ini dihitung jika penampang non-kompak, dengan persamaan:

$$M_n = \left(\frac{0,021E}{(D/t)} + f_y \right) S \dots\dots\dots (2.80)$$

Keterangan:

Z adalah modulus plastis penampang terhadap sumbu kuat (mm³)

S adalah modulus elastis penampang (mm³)

t adalah tebal pipa (mm)

2.9.6 Kuat Geser

Jika pelat sayap fungsi terbesarnya memikul momen lentur, maka pelat badan memiliki fungsi terbesar dalam memikul gaya geser, sehingga setelah kapasitas momen lentur memenuhi, maka pelat badan harus direncanakan agar memenuhi kriteria. Seperti yang telah disebutkan kuat geser rencana harus memenuhi persamaan 2.46. Ketentuan kondisi batas akibat leleh dan tekuk akibat geser:

$$V_n = 0,6 \cdot f_y \cdot A_w \cdot C_v \dots\dots\dots (2.81)$$

dimana,

$A_w = d \cdot t_w$ yang merupakan luas total pelat badan

$$\text{Jika } h/t_w \leq 2,24 \text{ maka } C_v = 1 \dots\dots\dots (2.82)$$

Profil tidak memenuhi ketentuan diatas, maka ditentukan berdasarkan rasio kelangsingan pelat badan dengan h/t_w .

Jika $h/t_w \leq 1,10 (k_v \cdot E/f_y)^{1/2}$, yang artinya kuat geser nominal dibatasi adanya leleh pada pelat badan, dan tidak dipengaruhi tekuk, maka:

$$C_v = 1 \dots\dots\dots (2.83)$$

Jika $1,10 (k_v \cdot E/f_y)^{1/2} < h/t_w \leq 1,37(k_v \cdot E/f_y)^{1/2}$, yang artinya kuat geser nominal mulai dipengaruhi oleh tekuk yang terjadi pada pelat badan, maka:

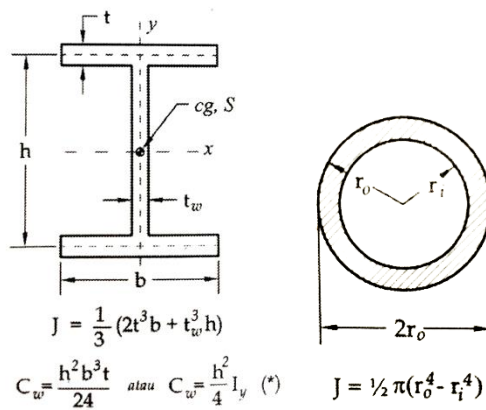
$$C_v = \frac{1,10 (k_v E / f_y)^{1/2}}{h/t_w} \dots\dots\dots (2.84)$$

Jika $h/t_w > 1,37(k_v E / f_y)^{1/2}$, yang artinya kuat geser nominal ditentukan oleh terjadinya tekuk elastis pada pelat badan, maka:

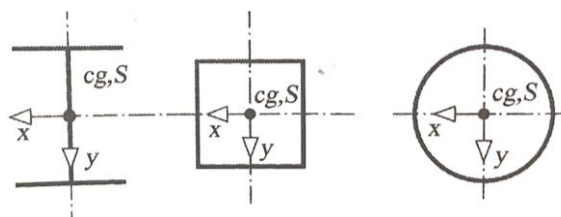
$$C_v = \frac{1,51 k_v E}{(h/t_w^2) f_y} \dots\dots\dots (2.85)$$

C_v adalah faktor reduksi untuk mengantisipasi terjadinya tekuk di pelat badan

k_v adalah koefisien tekuk pelat dengan nilai 5.0 untuk profil yang memenuhi syarat tanpa pengaku tegak dan kelangsingan badannya $h/t_w < 260$.



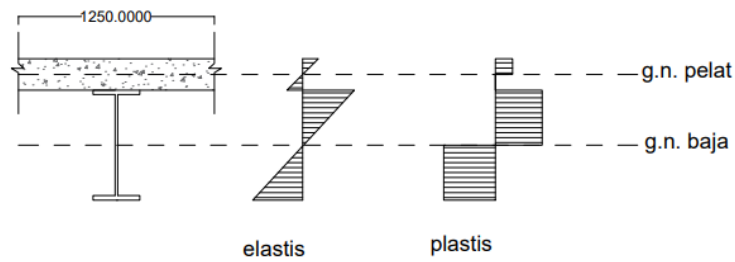
Gambar 2.25 Konstanta Torsi dan Konstanta Warping
(Sumber: Dewobroto, 2016)



Gambar 2.26 Pusat Geser (S) & Pusat Berat (cg)
(Sumber: Dewobroto, 2016)

2.10 Penampang Komposit

Penampang komposit pada kasus ini merupakan material baja dan beton yang disambung *shear connector* atau stud. Perbedaan pada penampang komposit dan non komposit terdapat pada perilaku saat penampang dibebani. Penampang non komposit jika dibebani akan mengalami tegangan pada beton dan baja secara individu, seperti pada gambar di bawah:



Gambar 2.27 Tegangan Penampang Non Komposit

Namun berbeda dengan penampang komposit yang akan bekerja sama dalam memikul beban, serta akan lebih ekonomis. Dalam analisis penampang komposit terdapat analisis elastis dan plastis, yang pemilihannya tergantung pada rasio antara tinggi dan tebal badan profil, serta memperhitungkan lebar pelat lantai yang ikut mengalami tegangan saat diberi beban atau yang disebut b_{ef} (lebar efektif). Berdasarkan (Badan Standarisasi Nasional, 2005) RSNI T-03-2005 bagian 8.2.1 bila lantai beton meliputi kedua sisi badan gelagar, lebar efektif (b_{ef}) harus diambil dari nilai terkecil dari:

$$b_{ef} \leq \frac{1}{5}L \dots\dots\dots (2.86)$$

$$b_{ef} \leq S \dots\dots\dots (2.87)$$

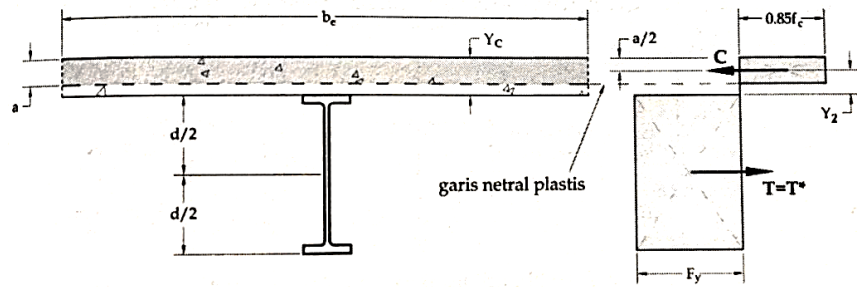
$$b_{ef} \leq 12t_p \dots\dots\dots (2.88)$$

Penentuan untuk analisis mempertimbangkan nilai h/t_w dan $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, jika:

$$h/t_w \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \dots\dots\dots (2.89)$$

maka menggunakan analisis plastis, yang ditentukan berdasarkan batas antara leleh tarik penampang baja (T) dengan kehancuran beton (C):

1. $T \leq C$, yaitu netral plastis di dalam pelat beton



Gambar 2.28 Tegangan Penampang Komposit Plastik G.N. pada Pelat
(Sumber: Dewobroto, 2016)

maka rumus momen nominal yang dipakai:

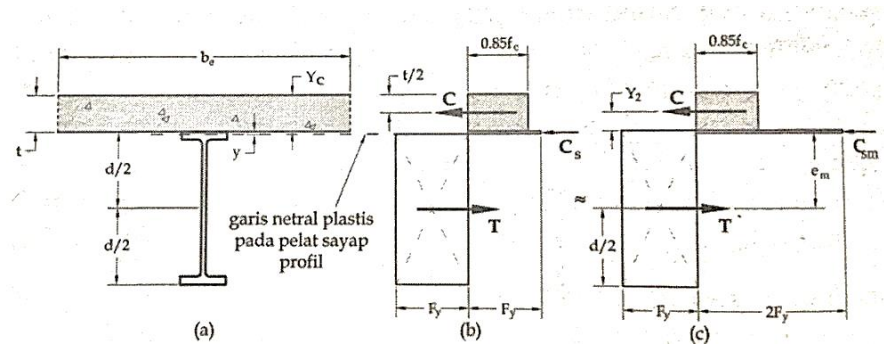
$$M_n = M_p = f_y A_s (Y_2 + \frac{1}{2}d) \dots \dots \dots (2.90)$$

$$Y_2 = Y_c - \frac{1}{2}a \dots \dots \dots (2.91)$$

$$Y_c = t \dots \dots \dots (2.92)$$

$$a = \frac{f_y A_s}{0,85 f_c b_{ef}} \dots \dots \dots (2.93)$$

2. $T > C$, yaitu netral plastis pada sayap baja



Gambar 2.29 Tegangan Penampang Komposit Plastik G.N. pada Sayap
(Sumber: Dewobroto, 2016)

maka rumus momen nominal yang dipakai:

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2}d) + C_{sm}(d-y) \frac{1}{2} \dots \dots \dots (2.94)$$

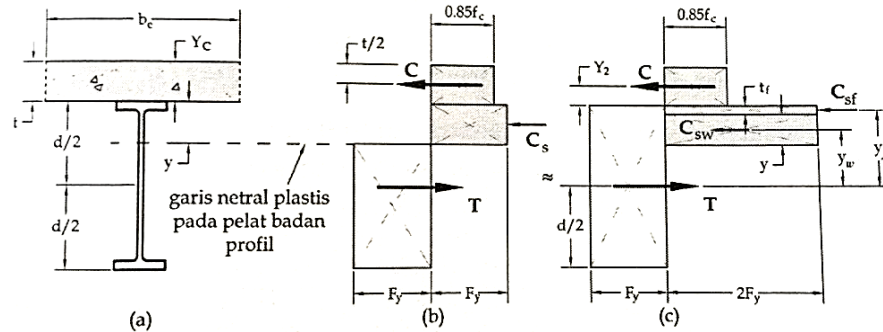
$$C_{sm} = 2f_y A_s \dots \dots \dots (2.95)$$

$$T = f_y A_s \dots \dots \dots (2.96)$$

$$C = 0,85 f_c b_{et} \dots \dots \dots (2.97)$$

$$y = \frac{T - C}{b_f f_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.98)$$

3. $T > C$, yaitu netral plastis pada badan baja



Gambar 2.30 Tegangan Penampang Komposit Plastis G.N. pada Badan
(Sumber: Dewobroto, 2016)

maka rumus momen nominal yang dipakai:

$$M_n = M_p = C \left(Y_2 + \frac{1}{2}d \right) + C_{fs} \cdot y_f + C_{sw} \cdot y_w \dots\dots\dots (2.99)$$

$$T = f_y \cdot A_s \dots\dots\dots (2.100)$$

$$C_{sf} = 2f_y \cdot b_f \cdot t_f \dots\dots\dots (2.101)$$

$$C_{sw} = 2f_y \cdot t_w \cdot y \dots\dots\dots (2.102)$$

$$y = \frac{T - C - C_{sf}}{t_w \cdot f_y} \dots\dots\dots (2.103)$$

$$y_f = \frac{1}{2} \cdot (d - t_f) \dots\dots\dots (2.104)$$

$$y_w = \frac{1}{2} \cdot (d + y) \cdot t_f \dots\dots\dots (2.105)$$

dimana,

$$T = f_y \cdot A_s \dots\dots\dots (2.106)$$

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_c \dots\dots\dots (2.107)$$

setelah M_n pada kondisi netral plastis didapatkan, selanjutnya menghitung momen *ultimate*:

$$M_u = \phi M_n \dots\dots\dots (2.108)$$

$$\text{Kontrol harus memenuhi: } M_u \text{ pembebanan} < M_u \text{ perencanaan} \dots\dots\dots (2.109)$$

Keterangan:

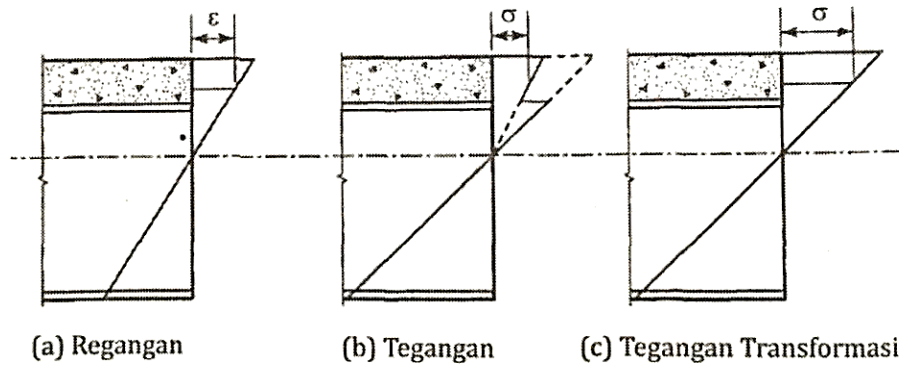
T adalah leleh tarik penampang baja

C adalah kehancuran/tekan beton

Nilai reduksi (ϕ) sebesar 0,9 (SNI 1729-2020)

Persyaratan yang sama namun persamaan yang berbeda jika analisis penampang elastis, jika syarat dibawah terpenuhi:

$$h/t_w > 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \dots\dots\dots(2.110)$$



Gambar 2.31 Tegangan Penampang Komposit Elastis

(Sumber: Dewobroto, 2016)

maka perlu melakukan perhitungan dengan keadaan batas leleh dengan tahapan:

1. Mencari transfer pelat beton baja

$$n = \frac{E_s}{E_c} \dots\dots\dots(2.111)$$

2. Mencari titik berat
3. Menghitung inersia balok komposit
4. Kontrol tegangan yang terjadi.

Tegangan yang terjadi pada penampang komposit elastis, dikontrol pada serat atas & bawah baja, dan serat atas beton, dengan syarat tegangan:

Serat atas baja

$$f_{st} = \frac{M \cdot y_t}{I} < f_y \dots\dots\dots(2.112)$$

Serat bawah baja:

$$f_{sb} = \frac{M \cdot y_b}{I} < f_y \dots\dots\dots(2.113)$$

serat atas beton:

$$f_{ct} = \frac{M \cdot \bar{y}}{n \cdot I} < f_c \dots\dots\dots(2.114)$$

2.11 Penghubung Geser/Shear Connector

Saat suatu penampang terdapat dua material dan direncanakan menjadi satu kesatuan, penampang tersebut dikatakan komposit. Pada penelitian ini direncanakan pelat lantai kendaraan dari material beton bertulang yang ditumpu oleh gelagar berbahan baja kemudian disambung dengan penghubung geser/*shear connector*, maka dengan adanya penghubung geser, penampang yang direncanakan menjadi komposit. Penghubung geser yang direncanakan harus cukup kaku untuk menahan gaya geser yang terjadi antara pelat beton dan gelagar baja agar tidak terjadi pergeseran satu sama lain. Jenis-jenis penghubung geser diantaranya *stud connectors*, *channel connectors*, *spiral connectors*, *angel connectors*. Pada penelitian ini, direncanakan *shear connectors*/penghubung jenis *stud*.



Gambar 2.32 *Shear Connector*

(Sumber: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/webinars/230622.pdf>)

Ada hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan penghubung geser, mengacu pada SNI 03-1729-2002 tentang butir 12.6.6, diantaranya:

1. Diameter maksimum $2,5 \cdot t_f$
2. Tebal selimut beton arah lateral minimum 25 mm
3. Jarak minimum antar penghubung geser sebesar $6 \cdot d_{sc}$
4. Jarak maksimum antar penghubung geser $8 \cdot t_f$

5. Jarak transversal antar penghubung geser sebesar $6.d_{sc}$

Tahapan perencanaan *shear connectors*/penghubung geser sebagai berikut:

1. Input parameter yang diperlukan, meliputi data gelagar (dimensi, A_g), lebar efektif balok (b_{ef}), tegangan beton (f'_c), modulus elastisitas beton (E_c), tegangan tarik putus (f_u), tegangan leleh baja (f_y).

2. Untuk asumsi diameter *stud*, hitung diameter maksimum sesuai SNI untuk taksiran ukuran *stud*:

$$D_{max} = 2,5.t_f \dots\dots\dots(2.115)$$

3. Menghitung kuat nominal satu penghubung geser (SNI 1729:2020 butir 2a):

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sa} \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot f_u \dots\dots\dots(2.116)$$

dimana, $A_{sa} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \dots\dots\dots(2.117)$

4. Menghitung gaya geser perlu:

Gaya geser perlu diambil nilai terkecil dari beberapa kondisi batas, yaitu:

$$V' = 0.85 \cdot f'_c \cdot A_c \dots\dots\dots(2.118)$$

$$V' = f_y \cdot A_s \dots\dots\dots(2.119)$$

$$V' = \Sigma Q_n \dots\dots\dots(2.120)$$

5. Menghitung jumlah penghubung geser yang diperlukan (butir 12.6.5):

$$n = \frac{V'}{Q_n} \dots\dots\dots(2.121)$$

6. Menghitung jarak antar *shear connector*, sesuai dengan bahan mengenai syarat perencanaan penghubung geser.

Keterangan:

t_f adalah tebal sayap profil baja (mm)

d_{sc} adalah diameter penghubung geser (mm)

E_c adalah modulus elastisitas beton (persamaan 2.164)

t_p adalah tebal pelat lantai (mm)

A_{sa} adalah luas penampang penghubung geser (mm²)

A_c adalah luas penampang beton (mm²)

A_s adalah luas penampang profil baja (mm²)

R_g dan R_p adalah parameter pengaruh pelatt beton dengan dek baja (SNI 1729:2020 butir 2a), yang berturut-turut bernilai 1,00 dan 0,75

2.12 Sambungan

Berdasarkan bahan yang digunakannya, sambungan dikategorikan menjadi sambungan baut dan sambungan las. Berdasarkan beban gaya yang dipikul, sambungan dapat dikategorikan menjadi empat meliputi sambungan geser, tarik, gabungan geser & tarik, dan momen. Berdasarkan konfigurasi bebannya, sambungan dikategorikan menjadi sambungan sederhana dan sambungan eksentris.

2.12.1 Sambungan Baut

Terdapat dua jenis baut yang umumnya digunakan yaitu A325 dan A490 merupakan baut dengan mutu tinggi, yang menandakan kualitas baut tersebut. Hasil perhitungan kuat rencana sambungan baut harus memenuhi:

$$\phi R_n > R_u \dots\dots\dots (2.122)$$

Tabel 2.8 Tegangan Tarik *Ultimate* Baut

Jenis Baut	Diameter (in)	Diameter (mm)	Tegangan Tarik f_u^b (Mpa)
A325	1/2 - 1	12,7 - 25,4	825
A325	1 1/8 - 1 1/2	28,6 - 38,1	725
A490	1/2 - 1 1/2	12,7 - 38,1	1035

Beberapa tipe sambungan yang berkolerasi pada penelitian ini yaitu:

1. Sambungan mengalami geser

Pola kegagalan sambungan geser terdapat dua kemungkinan yaitu baut putus dan pelat sobek/kekuatan tumpu, adalah jika dua pelat digabungkan menggunakan baut arah tegak lurus terhadap gaya (*perpendicular*), kemudian kedua pelat masing-masing ditarik kearah kanan dan kiri bautnya akan bergeser.

a. Baut putus

Persamaan dibawah dipakai untuk per baut dan per bidang geser.

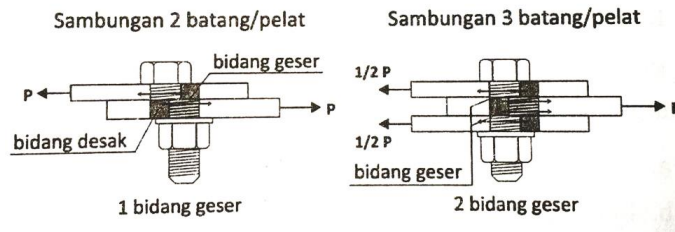
$$\phi R_n = \phi \cdot F_n \cdot A_b \dots\dots\dots (2.123)$$

Keterangan:

ϕ adalah nilai reduksi sebesar 0,75

F_{nv} adalah kekuatan geser yang dipikul baut ketika baut tersebut putus (diasumsikan ulir terdapat pada bidang geser) pada tabel J3.2 (Mpa)

A_b adalah luas penampang baut (mm^2)



Gambar 2.33 Bidang Geser Penampang

(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

b. Pelat sobek/kegagalan tumpu

$$\phi R_n = \phi \cdot 1,2 \cdot l_c \cdot t_p \cdot F_u^b \leq \phi \cdot 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot F_u^b \dots \dots \dots (2.124)$$

Keterangan:

ϕ adalah nilai reduksi sebesar 0,75.

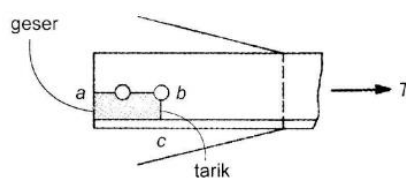
l_c adalah panjang bersih pelat sobek searah bekerjanya gaya (mm).

F_u^b adalah kekuatan tarik minimum yang disyaratkan dari material yang disambung (Mpa).

t_p adalah tebal pelat sambungan (mm).

d_b adalah diameter baut (mm).

c. *Block shear*



Gambar 2.34 Keruntuhan *Block Shear*

(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

Perhitungan untuk kekuatan rencana, diambil nilai terkecil diantara ruas kanan dan kiri: (Arifi & Setyowulan, 2021)

$$\phi R_n = 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \leq 0,6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \dots \dots \dots (2.125)$$

dimana:

$$A_{nv} = A_{gv} - nDT \dots \dots \dots (2.126)$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{DT} \dots \dots \dots (2.127)$$

Maka dapat dihitung kekuatan rencana $\phi R_n > \phi P_n$ dengan nilai reduksi 0,75

Keterangan:

A_{gv} adalah luas bruto bagian menahan geser (mm^2).

A_{gt} adalah luas bruto bagian menahan tarik (mm^2).

n_{DT} adalah perkalian antara jumlah lubang baut dimasing-masing bagian, diameter baut, spasi antar baut, dan tebal pelat (mm^2).

U_{bs} adalah koefisien reduksi, dengan aturan tegangan tarik merata dan tegangan tarik tidak merata masing-masing dengan nilai 1 dan 0,5.

Perhitungan jumlah kebutuhan baut didasarkan pada persamaan:

$$n = \frac{\phi P_n}{\phi R_n} \dots \dots \dots (2.128)$$

Keterangan:

Nilai ϕP_n didapat dari nilai minimum perhitungan batang

2. Sambungan mengalami tarik

Sambungan akan mengalami tarik jika gaya yang bekerja arahnya tegak lurus bidang sambungan.

$$\phi R_n = F_{nt} \cdot A_b \dots \dots \dots (2.129)$$

Keterangan:

ϕ bernilai 0,75

F_{nt} adalah tegangan tarik nominal dari tabel J3.2

3. Sambungan mengalami kombinasi geser dan tarik

Sambungan pada konstruksi yang memiliki kombinasi geser dan tarik, sambungan yang menghubungkan elemen-elemen kolom dan balok akan mengalami gaya geser dan tarik.

$$F_{nt}' = 1,3 F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} \cdot f_{rv} \dots \dots \dots (2.130)$$

$$\phi R_n = F_{nt}' A_b \dots \dots \dots (2.131)$$

Keterangan:

ϕ bernilai 0,75

F_{nt} adalah tegangan tarik nominal dari tabel J3.2

F_{nv} adalah tegangan geser dari tabel J3.2

F_{rv} adalah tegangan geser yang diperlukan menggunakan kombinasi beban

2.12.1.1 Jarak Baut

Menurut SNI 1729:2020 J3 spasi minimum antar baut:

$$S \geq 3.d_b \dots\dots\dots (2.132)$$

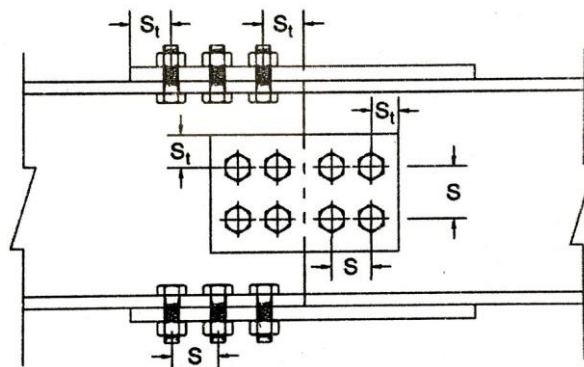
Keterangan:

d adalah diameter baut nominal

Jarak tepi minimum (S_t):

Tabel 2.9 Jarak Tepi Minimum

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



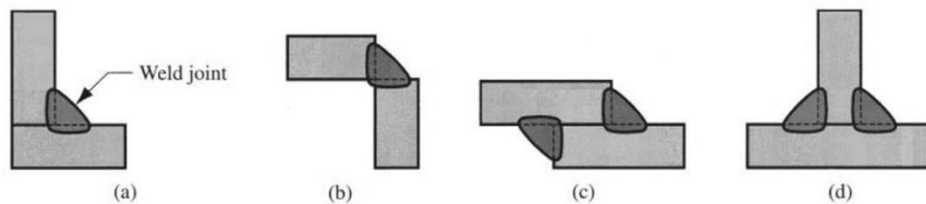
Gambar 2.35 Jarak dan Spasi Baut

(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

2.12.2 Sambungan Las

Sambungan las merupakan metode sambungan dengan pengelasan, yang mana didefinisikan sebagai proses fabrikasi logam atau penyambungan antar logam

dengan cara memanaskan logam pengisi hingga mencapai leleh. Adapun bahan logam pengisi tersebut harus minimal memiliki nilai kekuatan setara dengan material logam yang akan dilas, dan biasanya logam pengisi setara dengan nilai kekuatan sambungan baut. Salah satu jenis las adalah las sudut/ *fillet welds* yaitu las yang banyak ditemukan di lapangan. Perencanaan las sudut harus direncanakan dengan detail, karena kekuatan yang diberikan sambungan las tergantung dari ketebalan panjang las sudutnya, berikut ilustrasi; las sudut yang dilansir dari Situs Web Metropolitan Indonesia.



Gambar 2.36 Las Sudut/*Fillet welds*

Kekuatan las sudut harus memenuhi syarat:

$$\phi R_n > \phi P_u \dots\dots\dots (2.133)$$

Dengan memperhitungkan kekuatan bahan las:

$$\phi R_n = 0,75 \cdot 0,707 \cdot A_w \cdot f_{nw} \dots\dots\dots (2.134)$$

dimana,

$$f_{nw} = 0,6 \cdot f_{Exx} \dots\dots\dots (2.135)$$

Kegagalan pada area las bisa jadi menyebabkan kegagalan pada bahan baja, maka dapat dikontrol, dengan persamaan:

1. leleh geser

$$\phi R_n = 1,0 \cdot t_p \cdot l \cdot f_{yp} \dots\dots\dots (2.136)$$

2. fraktur geser

$$\phi R_n = 0,75 \cdot t_p \cdot l \cdot f_{up} \dots\dots\dots (2.137)$$

Ketebalan las sudut didesain dengan ketentuan yang mengacu pada SNI 1729-2020 pasal J.2b, yaitu:

Tabel 2.10 Ukuran Tinggi Minimum Las Sudut

Ketebalan Material dari Bagian Paling Tipis yang Tersambung (mm)	Ukuran Minimum Las Sudut (mm) (t_{wmin})
Sampai dengan 6	3
Lebih besar dari 6 s.d. 13	5
Lebih besar dari 13 s.d. 19	6
Lebih besar dari 19	8

Ukuran maksimum ketebalan las sudut:

jika $t_p < 6$ mm, maka $t_{wmax} \leq t_p$(2.138)

jika $t_p \geq 6$ mm, maka $t_{wmax} \leq t_p - 2$ mm.....(2.139)

Panjang las sudut:

$l = P_u / \phi R_n$ (2.140)

Keterangan:

ϕR_n diambil nilai terkecil dari ketiga kekuatan

f_{Exx} adalah mutu las

f_{nw}, f_{yp} dan f_{up} adalah kekuatan geser dari nilai 0,6 dikalikan dengan kekuatan tarik bahan

t_p adalah ketebalan baja yang diperkirakan akan mengalami kegagalan

l adalah panjang las

2.13 Penulangan

Penulangan dilakukan pada elemen yang terdapat unsur beton, sehingga menjadi beton bertulang. Elemen yang memakai beton bertulang pada tugas akhir ini adalah trotoar, pelat lantai, dan *abutment*.

Tulangan terdapat dua jenis yaitu tulangan polos dan berulir. Tulangan berulir akan lebih meningkatkan daya lekat dan menahan gerakan yang terjadi, sehingga tulangan dan beton akan lebih terkunci. Sifat mekanis dan kelas baja tulangan tersaji pada tabel dibawah.

Kelas baja tulangan	Uji tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
	Kuat luluh/leleh (YS)	kuat tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.	sudut lengkung	diameter pelengkung	
	MPa	MPa	%		mm	
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 (d ≤ 10 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	-
			12 (d ≥ 12 mm)	180°	5d (d ≥ 19 mm)	
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 (d ≤ 10 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
			12 (d ≥ 13 mm)	180°	5d (d ≥ 19 mm)	
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	9 (d ≤ 19 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
			8 (22 ≤ d ≤ 25 mm)	180°	5d (19 ≤ d ≤ 25 mm)	
			7 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	14 (d ≤ 19 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
				180°	5d (19 ≤ d ≤ 25 mm)	
			10 (d > 36 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,25
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,25
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,15
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	

Keterangan:
1. d adalah diameter nominal baja tulangan beton
2. hasil uji lengkung tidak boleh menunjukkan retak pada sisi luar lengkungan benda uji lengkung

Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2016a

Pelat lantai umumnya adalah tipe pelat satu arah, sehingga dalam perencanaan penulangan dihitung tulangan utama pada arah melintang dan tulangan minimum pada arah memanjang jembatan, begitu pun asumsi untuk trotoar.

menghitung momen nominal:

$$M_n = \frac{Mu}{\phi} \dots \dots \dots (2.141)$$

menghitung rasio tulangan minimum:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \dots \dots \dots (2.142)$$

menghitung rasio tulangan maksimum dengan asumsi kondisi seimbang:

$$\rho_{\max} = 0,75 \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \beta \frac{600}{600 + f_y} \dots \dots \dots (2.143)$$

menghitung faktor tahanan momen:

$$R_n = M_u \cdot b \cdot d^2 \dots\dots\dots (2.144)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_c} \dots\dots\dots (2.145)$$

menghitung faktor tahanan momen maksimum:

$$R_{max} = \rho_{max} \cdot f_y \cdot \left[1 - \frac{\frac{1}{2} \rho_{max} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c} \right] \dots\dots\dots (2.146)$$

kontrol, jika $R_{max} > R_n$ maka kondisi yang diasumsikan aman

1. Tulangan utama (arah melintang)

menghitung rasio tulangan perlu:

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.147)$$

syarat, $\rho_{min} < \rho_{perlu} < \rho_{max}$

menghitung luasan perlu:

$$A_s = 20\% \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (2.148)$$

mencari diameter tulangan:

$$D_t = \frac{4s \cdot A_s}{\pi \cdot b} \dots\dots\dots (2.149)$$

mencari jumlah tulangan:

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \pi D^2} \dots\dots\dots (2.150)$$

mencari jarak antar tulang:

$$s = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 b}{A_s} \dots\dots\dots (2.151)$$

mencari luas tulangan pasang:

$$A_s \text{ pasang} = n \cdot A_s \dots\dots\dots (2.152)$$

$$\text{syarat, } A_s \text{ pasang} > A_s \dots\dots\dots (2.153)$$

Kontrol kuat lentur momen *ultimate* penampang

$$a = \frac{f_y \cdot A_s}{0,85 \cdot f_c \cdot b_{ef}} \dots\dots\dots (2.154)$$

$$M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{1}{2}a\right) \dots \dots \dots (2.155)$$

syarat, $M_n \text{ pelat} > M_n \text{ beban}$

2. Tulangan bagi (arah memanjang)

Menghitung tulangan arah memanjang

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \dots \dots \dots (2.156)$$

mencari diameter tulangan:

$$D = \frac{4s \cdot A_s}{\pi \cdot b} \dots \dots \dots (2.157)$$

mencari jumlah tulangan:

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4}\pi D^2} \dots \dots \dots (2.158)$$

mencari jarak antar tulang:

$$s = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 b}{A_s} \dots \dots \dots (2.159)$$

mencari luas tulangan pasang:

$$A_s \text{ pasang} = n \cdot A_s \dots \dots \dots (2.160)$$

syarat, $A_s \text{ pasang} > A_s$

Kontrol kuat lentur momen *ultimate* penampang

$$a = \frac{f_y \cdot A_s}{0,85 \cdot f_{t_c} \cdot b_{ef}} \quad (2.161)$$

$$M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{1}{2}a\right) \dots \dots \dots (2.162)$$

syarat, $M_n \text{ pelat} > M_n \text{ beban}$

3. Menghitung gaya geser akibat beban kendaraan

menghitung keliling dan luas kritis.

menghitung gaya geser *ultimate* beton:

$$V_{uc} = 1 + \left[\frac{2}{\beta}\right] \cdot \frac{\sqrt{f'_{t_c}}}{5} \cdot A \dots \dots \dots (2.163)$$

menghitung kuat geser nominal beton:

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_{t_c}}}{3} \cdot A \dots \dots \dots (2.164)$$

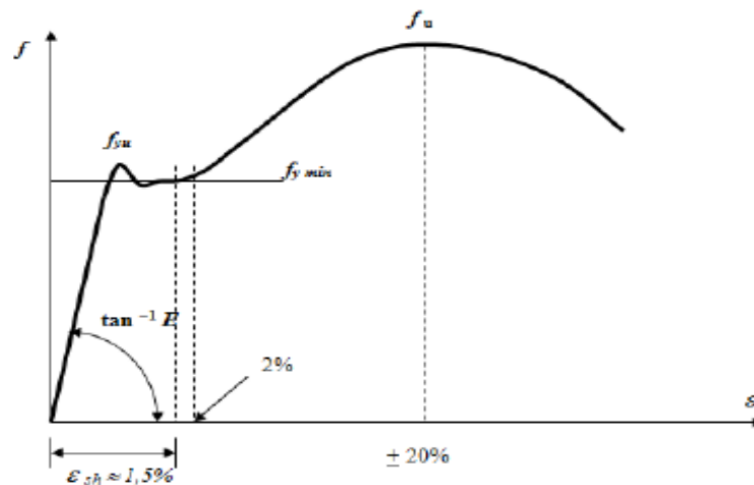
syarat, $V_c > V_{uc}$ & $V_n \leq V_{uc}$, maka pelat aman dan tidak memerlukan tulangan geser.

2.14 Sifat Mekanis

Sifat mekanis merupakan sifat yang menunjukkan karakteristik material jika material tersebut dibebani.

2.14.1 Baja

Sifat Mekanis baja sangat penting diketahui agar mendapatkan struktur baja yang sempurna dalam memikul beban rencana. Struktur baja dikatakan aman dalam memikul beban rencana dilihat dari besaran tegangan pada material yang disesuaikan dengan gaya yang dipikul. dalam artian, struktur material baja memiliki tegangan minimum sebagai kekuatan akhir dalam menerima beban.



Gambar 2.37 Kurva Tegangan-Regangan Baja

Terdapat persyaratan minimum untuk sifat mekanis baja struktural yang harus dipenuhi menurut RSNI T-03-2005 hal. 7 dari 132 bagian 4.4.1, sebagai berikut:

Tabel 2.11 Sifat Mekanis Baja Struktural

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

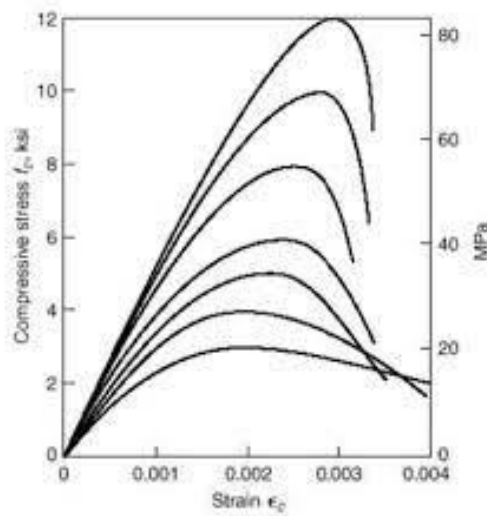
Adapun sifat-sifat mekanis baja struktural lainnya untuk maksud perencanaan ditetapkan sebagai berikut:

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

2.14.2 Beton

Nilai modulus elastisitas digambarkan dengan kemiringan kurva kuat tekan beton yang ditarik garis dari nol. Nilai regangan pada beton tidak sama dengan tegangan, yang mengartikan bahan beton tidak sepenuhnya elastis, namun nilai modulus elastisitas akan berubah menyesuaikan dengan kekuatan beton. Menurut (Badan Standarisasi Nasional, 2019) SNI 2847:2019, nilai modulus elastisitas beton kepadatan normal $w_c = 2320 \text{ kg/m}^3$ yaitu:

$$E_c = 4700\sqrt{f'c'} \dots\dots\dots(2.165)$$



Gambar 2.38 Kurva Tegangan-Regangan Beton

(Sumber: [https://encrypted-](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSErKbbfQVsH0nI0jNBgnc9At08tDhb-okPo1AQYR9EDRpwHqyTjAVzUIMuqJtx7BjZFPY&usqp=CAU)

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSErKbbfQVsH0nI0jNBgnc9At08tDhb-okPo1AQYR9EDRpwHqyTjAVzUIMuqJtx7BjZFPY&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSErKbbfQVsH0nI0jNBgnc9At08tDhb-okPo1AQYR9EDRpwHqyTjAVzUIMuqJtx7BjZFPY&usqp=CAU))