

2 LANDASAN TEORI

2.1 Jembatan

Jembatan adalah konstruksi yang dibangun pada rute jalan yang melewati rintangan seperti lembah, rawa, jurang, sungai dan bangunan lainnya yang terletak di bawah rute jalan tersebut. Jembatan berfungsi sebagai penghubung jalan yang terputus akibat rintangan yang membatasi dua jalur tersebut sehingga pembangunan jembatan menjadi sangat penting untuk arus transportasi (Supriyadi & Muntohar, 2007).

Menurut Supriyadi dan Muntohar (2007), berdasarkan bahan dan material, jembatan dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Jembatan Gelagar Baja

Jembatan gelagar baja terdiri atas jembatan gelagar non komposit dan komposit/balok gabungan. Jembatan gelagar non komposit adalah jembatan yang tidak menggunakan penghubung geser (*shear connector*). Sedangkan jembatan gelagar komposit adalah balok baja dengan lantai yang dihubungkan dengan penghubung geser.

2. Jembatan Gelagar Beton

Jembatan gelagar beton terdiri atas jembatan beton bertulang dan jembatan beton prategang. Jembatan beton bertulang adalah struktur jembatan yang memakai bahan beton dan tulangan baja. Jembatan beton prategang adalah struktur jembatan yang memakai bahan beton dan kawat baja bermutu tinggi (*strand cable*), kawat baja tersebut ditarik terlebih dahulu sebelum bekerjanya beban luar. Kawat baja yang ditarik menyebabkan beton yang ada di sekitarnya menjadi tertekan, sehingga beton mampu menahan beban lebih tinggi sebelum mengalami keretakan.

2.1.1 Bagian Struktur Jembatan

Struktur atas jembatan adalah bagian jembatan yang menerima beban langsung yang meliputi berat sendiri, beban mati struktur, beban mati tambahan, beban hidup berupa kendaraan, gaya rem, serta beban pejalan kaki. Struktur atas umumnya terdiri dari pelat lantai kendaraan, trotoar, gelagar jembatan, diafragma,

plat deck, dan railing jembatan. Struktur bawah jembatan berfungsi untuk menahan seluruh beban struktur di atas dan beban lain yang ditimbulkan oleh tekanan tanah, aliran air dan hanyutan, tumbukan, gesekan pada tumpuan lainnya, dan sebagainya yang kemudian disalurkan ke pondasi. Struktur bawah jembatan umumnya terdiri dari abutment dan pilar (*pier*). Fondasi adalah struktur yang berfungsi untuk meneruskan seluruh beban jembatan ke dasar tanah.

2.2 Pembebanan Jembatan

2.2.1 Berat Sendiri

Berat Sendiri dari bangunan adalah berat dari masing masing bagian struktural dan elemen-elemen non-struktural. Termasuk dalam hal ini segala unsur tambahan yang dianggap merupakan satu kesatuan tetap dengannya.

Menentukan besarnya berat beban mati, harus menggunakan syarat nilai berat isi sebagai berikut:

- Beton biasa	25,00 kN/m ³
- Beton prategang	25,50 kN/m ³
- Baja bertulang	7,85 kN/m ³
- Air	10 kN/m ³

Berdasarkan SNI 1725 (2016), Untuk nilai faktor beban yang dipakai pada berat beban sendiri dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Faktor Beban Berat Sendiri

Jenis Material	Faktor Beban		
	K_{MS}^S	K_{MS}^U	
		Normal	Terkurangi
Baja, aluminium	1.00	1.10	0.9
Beton pracetak	1.00	1.20	0.85
Beton cor ditempat	1.00	1.30	0.75
Kayu	1.00	1.40	0.70

Sumber : SNI 1725 (2016)

2.2.2 Beban Mati Tambahan

Beban mati tambahan adalah berat dari seluruh bahan pembentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non struktural, dan besar bebannya dapat berubah selama umur jembatan. Beban mati tambahan berupa:

- Aspal beton setebal 50 mm untuk pelapisan kembali (*overlay*) di kemudian hari.
- Genangan air hujan setinggi 50 mm apabila saluran drainase tidak bekerja dengan baik.

Dalam hal tertentu harga γ_{MA}^S yang telah berkurang dapat digunakan dengan persetujuan instansi terkait yang memiliki wewenang. Hal ini bisa dapat dilakukan apabila instansi yang berwenang mengawasi beban mati tambahan sehingga tidak melampaui selama umur jembatan. Faktor beban mati tambahan dituliskan di dalam SNI 1725 (2016).

Tabel 2.2 Faktor Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
	Keadaan		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 : SNI 1725 (2016)

2.2.3 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas dalam perencanaan struktur jembatan terdiri atas beban lajur “D” dan beban truk “T”. Beban lajur “D” bekerja pada lebar lajur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang sebanding dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Beban truk “T” adalah satu kendaraan berat dengan 3 as (gandar) yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam

lajur lalu lintas yang direncanakan. Tiap as terdiri dari 2 bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat.

2.2.3.1 Beban Lajur “D”

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas q kPa, dimana besaran q tergantung pada panjang total yang dibebani L seperti berikut :

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m, } q = 9,0 \text{ kPa} \quad (2.1)$$

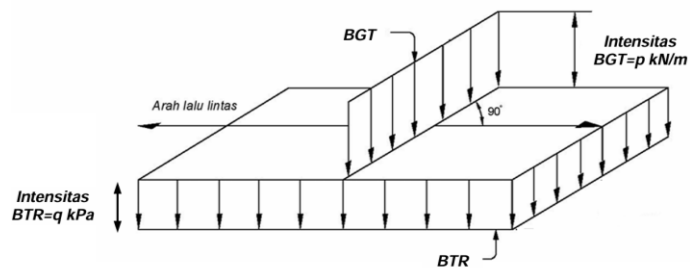
$$\text{Jika } L \geq 30 \text{ m, } q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad (2.2)$$

dimana:

q = Intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan

L = Panjang jembatan (m)

Berdasarkan SNI 1725 (2016) – Beban terbagi rata, beban garis memiliki intensitas, $p = 49 \text{ kN/m}$



Gambar 2.1 Beban Lajur "D"

Sumber : SNI 1725 (2016)

Tabel 2.3 Faktor Beban untuk beban lajur “D”

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

Sumber : SNI 1725 (2016)

Faktor beban dinamis (*Dynamic Load Allowance*) untuk KEL diambil sebagai berikut:

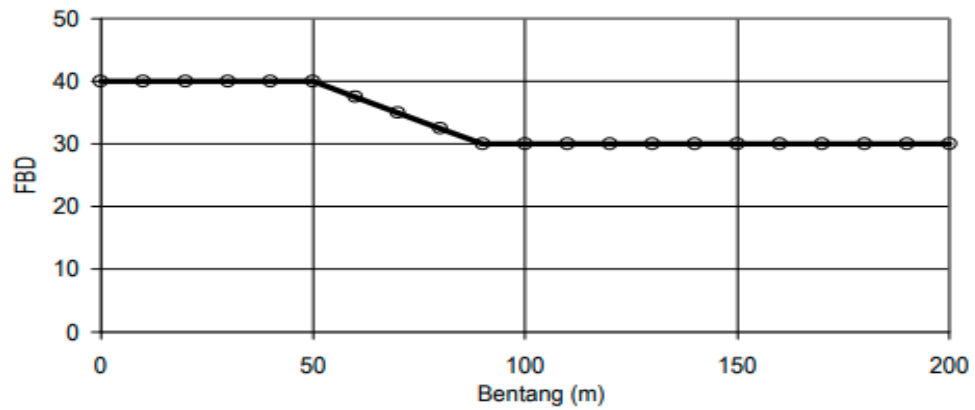
$$DLA = 0,4 \quad (2.3)$$

untuk $L \leq 50$ m

$$DLA = 0,4 - 0,0025 \times (L - 50) \quad \text{untuk } 50 < L < 90 \text{ m} \quad (2.4)$$

$$DLA = 0,3 \quad (2.5)$$

untuk $L \geq 90$ m



Gambar 2.2 Grafik Faktor Beban Dinamis

Sumber : SNI 1725 (2016)

$$\text{Beban merata pada PCI girder,} \quad Q_{TD\,PCI} = q \times s \quad (2.6)$$

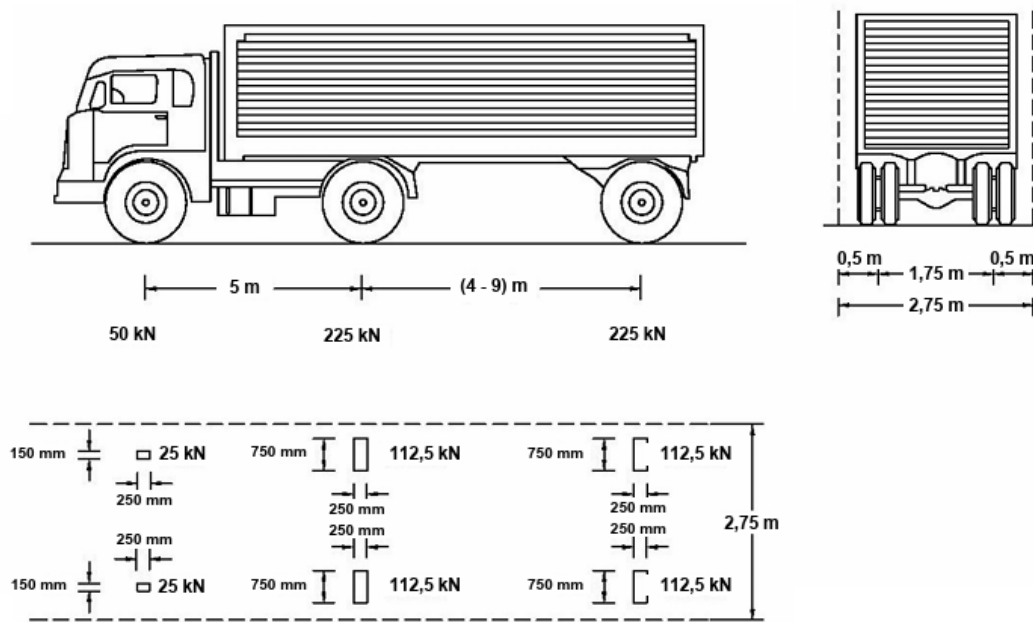
$$\text{Beban merata pada box girder,} \quad Q_{TD\,Box} = \frac{q \times (B+5,5)}{2} \quad (2.7)$$

$$\text{Beban terpusat pada PCI girder,} \quad P_{TD\,PCI} = (1 + DLA) \times p \times s \quad (2.8)$$

$$\text{Beban terpusat pada box girder,} \quad P_{TD\,Box} = \frac{(1+DLA) \times p \times (B+5,5)}{2} \quad (2.9)$$

2.2.3.2 Beban Truk “T”

Beban truk “T” tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. Beban truk hanya dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai.



Gambar 2.3 Pembebanan Truk “T” (500 kN)

Sumber : SNI 1725 (2016)

Beban hidup pada lantai jembatan berupa beban roda ganda oleh truk (beban T) yang besarnya, $T = 100 \text{ kN}$

Faktor beban dinamis untuk pembebanan truk diambil, $DLA = 0,4$

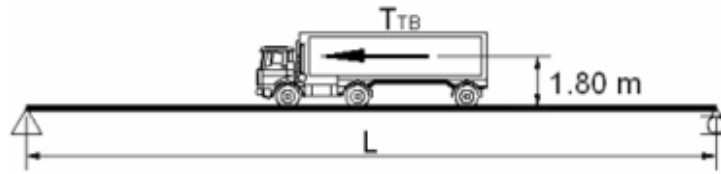
$$\text{Beban truk, } P_{TT} = (1+DLA) \times T \quad (2.10)$$

2.2.4 Gaya Rem

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

- 25% dari berat gandar truk desain; atau
- 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR)

Gaya rem harus ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati dan berisi lalu lintas dengan arah yang sama. Gaya rem harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan.



Gambar 2.4 Pembebanan Gaya Rem

Sumber : SNI 1725 (2016)

2.2.5 Beban Angin

Tekanan angin rencana harus dikerjakan baik pada struktur jembatan maupun pada kendaraan yang melintas jembatan. Jembatan yang direncanakan harus bisa memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut diasumsikan sebagai tekanan menerus dengan gaya sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan. Beban kerja dan terfaktor angin yang bekerja pada jembatan didapat dari persamaan:

Transfer beban angin ke lantai jembatan:

$$Q_{EW} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{x} \cdot T_{EW} \quad (2.11)$$

dimana:

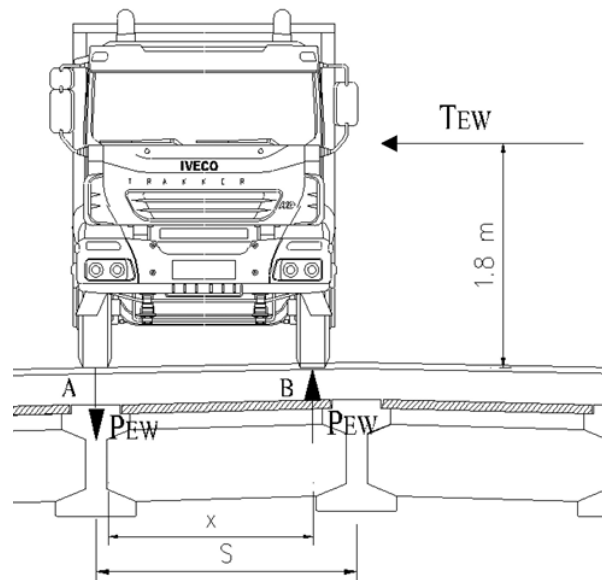
Q_{EW} = Beban angin (kN/m)

h = Jarak permukaan jalan terhadap bidang tiup samping kendaraan (1,80 m).

x = jarak antara roda kendaraan (1,75 m)

T_{EW} = Tekanan angin (kN/m)

Q_{EW} = transfer beban angin ke lantai jembatan (kN/m)



Gambar 2.5 Pembebanan Beban Angin Terhadap Balok Prategang

Sumber : SNI 1725 (2016)

2.2.6 Beban Gempa

Jembatan yang direncanakan harus memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun diperkirakan pula dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa. Gaya angkat efektif yang dijelaskan pada SNI 2833 (2016), untuk menahan gaya gempa vertikal diambil 10% dari reaksi akibat beban permanen bila bentang jembatan berupa bentang sederhana. Untuk menghitung gaya gempa vertikal rencana digunakan rumus sebagai berikut :

$$T_{EQ} = 0,01 \times W_t \quad (2.12)$$

dimana:

T_{EQ} = gaya gempa vertikal rencana (kN).

W_t = berat total struktur terdiri dari beban mati sendiri dan beban mati tambahan.

2.2.7 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan pada struktur pada konstruksi jembatan terbagi menjadi 2 jenis, yaitu kombinasi batas ultimit dan batas layan. Kombinasi tersebut telah tercantum pada SNI 1725 (2016) tentang pembebanan untuk jembatan.

- Kuat I : Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai.
- Kuat II : Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kendaraan khusus yang ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin.
- Kuat III : Kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenai beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Kuat IV : Kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar.
- Kuat V : Kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
- Ekstrem I : Kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup γ_{EQ} yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan.
- Ekstrem II : Kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup berkurang dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat tumbukan kendaraan (TC). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasikan dengan beban akibat tumbukan kendaraan dan tumbukan kapal.
- Layan I : Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhitungkan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.

Kombinasi ini juga digunakan untuk mengontrol lendutan pada gorong gorong baja, pelat pelapis terowongan, pipa termoplastik serta untuk

mengontrol lebar retak struktur beton bertulang; dan juga untuk analisis tegangan tarik pada penampang melintang jembatan beton segmental. Kombinasi pembebanan ini juga harus digunakan untuk investigasi stabilitas lereng.

- Layan II : Kombinasi pembebanan yang ditujukan untuk mencegah terjadinya pelelehan pada struktur baja dan selip pada sambungan akibat beban kendaraan.
- Layan III : Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada arah memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental.
- Layan IV : Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak.
- Fatik : Kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas.

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW _s	EW _L	BF	EU _n	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	-	-	-	1,0 0	-	-
Ekstrem II	γ_p	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,0 0	1,0 0
Daya Jalan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Jalan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya Jalan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Jalan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Fatig (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan : - γ_p dapat berupa $\gamma_{SE}, \gamma_{RM}, \gamma_{IM}, \gamma_{RL}, \gamma_{SH}$, tergantung beban yang ditinjau

- γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa

Gambar 2.6 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Sumber : SNI 1725 (2016)

2.3 Pelat Lantai Kendaraan

Pelat lantai kendaraan adalah elemen struktur jembatan yang mempunyai fungsi penting dalam struktur jembatan. Pelat lantai kendaraan harus direncanakan sedemikian rupa sehingga mampu menahan beban yang bekerja di atasnya.

2.3.1 Menentukan Tebal Plat Lantai

Pelat lantai kendaraan harus memenuhi persyaratan tebal minimum, yaitu:

$$ts \geq 200 \text{ mm} \quad (2.13)$$

$$ts \geq (100 + 40 l) \text{ mm} \quad (2.14)$$

dengan,

l = bentang pelat diukur dari pusat ke pusat tumpuan (m)

2.3.2 Pembebanan dan Statika Pelat Lantai Kendaraan

Pembebanan pelat lantai kendaraan meliputi beban mati dan beban hidup. Statika pada pelat lantai ditinjau masing-masing pembebanan sehingga diperoleh momen lentur akibat beban mati dan momen lentur akibat beban hidup. Kemudian kedua momen lentur tersebut dikombinasikan untuk memperoleh momen ultimit yang akan digunakan dalam perencanaan penulangan pelat lantai kendaraan.

2.3.3 Penulangan Pelat Lantai Kendaraan

Berikut adalah tahapan perencanaan penulangan pelat lantai kendaraan:

- a. Menghitung rasio tulangan,

$$\rho_{\min} = \frac{1,0}{f_y} \quad (2.15)$$

$$\rho_b = \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \quad (2.16)$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \times \rho_b \quad (2.17)$$

- b. Menghitung momen nominal,

Momen nominal diperoleh dari rumus berikut:

$$M_n = M_u / \phi \quad (2.18)$$

dengan,

ϕ = faktor reduksi yang besarnya 0,80

- c. Menghitung tahanan momen nominal,

$$R_n = M_n / b \cdot d^2 \quad (2.19)$$

dengan,

b = lebar pelat yang ditinjau (1000 mm)

d = tinggi efektif yang diperoleh dari selisih tebal pelat dengan tebal selimut beton

- d. Menghitung tahanan momen maksimum,

$$R_{\max} = \rho_{\max} \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{1/2 \cdot \rho_{\max} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c'} \right) \quad (2.20)$$

- e. Kontrol $R_n > R_{\max}$,

- f. Menghitung rasio tulangan yang diperlukan,

$$\rho = 0,85 \frac{f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f_c'}} \right) \quad (2.21)$$

- g. Menentukan rasio tulangan yang digunakan,

Penentuan rasio tulangan yang akan digunakan untuk perhitungan berikutnya harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

jika $\rho < \rho_{min}$, maka digunakan ρ_{min} ,

jika $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$, maka digunakan ρ ,

jika $\rho > \rho_{max}$, maka digunakan ρ_{max} .

- h. Menghitung luas tulangan yang diperlukan,

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.22)$$

Luas tulangan yang telah dihitung harus memenuhi persyaratan minimum yang telah ditetapkan dalam RSNI T-12-2004 untuk pelat lantai yang ditumpu balok atau dinding,

$$\frac{A_s}{b \cdot d} \geq \frac{1,0}{f_y} \quad (2.23)$$

- i. Menentukan jarak antar tulangan,

$$S = \left(\frac{1}{4} \pi \cdot d_t^2 \cdot b \right) / A_s \quad (2.24)$$

dengan,

d_t = diameter tulangan yang digunakan

Berdasarkan RSNI T-12-2004, untuk tulangan bagi pada arah memanjang jembatan diambil 30% - 67% dari luas tulangan lentur (A_s).

2.4 Beton Pracetak

Menurut SNI 03-2847 (2013), Beton pracetak adalah elemen beton struktur yang dicetak di tempat lain dari posisi akhirnya dalam struktur. Dalam penelitiannya, Ervianto (2006), menjelaskan bahwa, beton pracetak dihasilkan dari proses produksi dimana lokasi pembuatannya berbeda dengan lokasi elemen yang akan digunakan. Lawan dari *precast* adalah beton cor di tempat atau *cast-in place*, dimana proses produksinya berlangsung di tempat elemen tersebut akan ditempatkan.

Beton pracetak merupakan suatu metode percetakan komponen secara mekanisasi dalam pabrik atau *workshop* dengan memberi waktu pengerasan dan mendapatkan kekuatan sebelum dipasang. Karena proses pengecorannya di tempat khusus (bengkel pabrikasi), maka mutunya dapat terjaga dengan baik. Tetapi agar

dapat menghasilkan keuntungan, maka beton pracetak hanya akan diproduksi jika jumlah bentuk *typical*-nya mencapai angka minimum tertentu, bentuk *typical* yang dimaksud adalah bentuk-bentuk repetitif dalam jumlah besar (Pratiwi dkk., 2021). Sistem struktur beton pracetak merupakan salah satu alternatif teknologi dalam perkembangan konstruksi di Indonesia yang mendukung efisiensi waktu, efisiensi energi, dan mendukung pelestarian lingkungan (Siti Aisyah Nurjannah, 2011).

2.5 Beton Prategang

Beton prategang adalah jenis beton dimana tulangan baja ditarik/ditegangkan terhadap betonnya. Penarikan ini menghasilkan sistem kesetimbangan pada tegangan dalam (tekan pada beton dan tarik pada baja) yang akan meningkatkan kemampuan beton menahan beban luar. Karena beton cukup kuat dan daktail terhadap tekanan dan sebaliknya lemah serta rapuh terhadap tarikan maka kemampuan menahan beban luar dapat ditingkatkan dengan diberikan pratekan. Sedangkan menurut komisi ACI, beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan dalam dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban luar.

2.5.1 *Prestressed Concrete I Girder (PCI Girder)*

PC-I *Girder* merupakan *girder* jembatan yang memiliki bentuk penampang I dengan penampang bagian tengah lebih langsing daripada bagian pinggir. PC-I *Girder* merupakan *girder* dengan penampang yang kecil dibanding dengan jenis *girder* lainnya dan memiliki berat sendiri yang relatif lebih ringan per unitnya, oleh sebab itu biasanya dari hasil analisis PC-I *Girder* adalah penampang yang ekonomis. Selain itu *trend* penggunaan balok beton prategang dengan bentuk I dipilih karena dianggap mudah dalam proses pembuatan, lebih efisien, dan mudah pelaksanaannya di lapangan (Manalip & Dwi Handono, 2018). Contoh penampang PC-I *Girder* dapat dilihat pada Gambar 1.



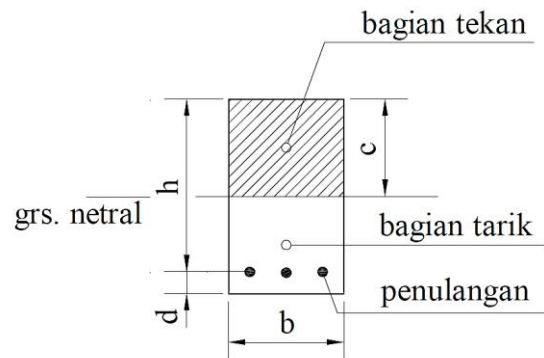
Gambar 2.7 PCI Girder Segmental

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2.6 Struktur Beton Prategang

Beton prategang atau *prestressed concrete* merupakan beton struktural dimana tegangan dalam diberikan untuk mereduksi tegangan tarik potensial dalam beton yang dihasilkan dari beban (SNI 03-2847, 2013). Beton prategang juga dapat di definisikan sebagai beton dimana tegangan tariknya pada kondisi pembebanan tertentu dihilangkan atau dikurangi sampai batas aman dengan pemberian gaya tekan permanen, dan baja prategang yang digunakan untuk keperluan ini ditarik sebelum beton mengeras (pratarik) atau setelah beton mengeras (pascatarik).

Seperti yang telah diketahui bahwa beton adalah suatu material yang tahan terhadap tekanan, akan tetapi tidak tahan terhadap tarikan. Sedangkan baja adalah suatu material yang sangat tahan terhadap tarikan. Dengan mengkombinasikan antara beton dan baja dimana beton yang menahan tekanan sedangkan tarikan ditahan oleh baja akan menjadi material yang tahan terhadap tekanan dan tarikan yang dikenal sebagai beton bertulang (*reinforced concrete*). Jadi pada beton bertulang, beton hanya memikul tegangan tekan, sedangkan tegangan tarik dipikul oleh baja sebagai penulangan (*rebar*). Sehingga pada beton bertulang, penampang beton tidak dapat efektif 100% digunakan, karena bagian yang tertarik tidak diperhitungkan sebagai pemikul tegangan.



Gambar 2.8 Distribusi Tegangan pada Beton

Sumber : Buku Ajar Perencanaan Struktur Beton Prategang

Gaya tarik pada beton bertulang dipikul oleh besi penulangan (*rebar*). Kelemahan lain dari konstruksi beton bertulang adalah berat sendiri (*self weights*) yang besar, yaitu 2.400 kg/m^3 , dapat dibayangkan berapa berat penampang yang tidak diperhitungkan untuk memikul tegangan (bagian tarik). Untuk mengatasi ini pada beton diberi tekanan awal sebelum bebanbeban bekerja, sehingga seluruh penampang beton dalam keadaan tertekan seluruhnya, inilah yang kemudian disebut beton pratekan atau beton prategang (*prestressed concrete*).

Dengan memberikan tekanan terlebih dahulu (pratekan) pada bahan beton yang pada dasarnya getas akan menjadi bahan yang elastis. Dengan memberikan tekanan (dengan menarik baja mutu tinggi), beton yang bersifat getas dan kuat memikul tekanan, akibat adanya tekanan internal ini dapat memikul tegangan tarik akibat beban eksternal.

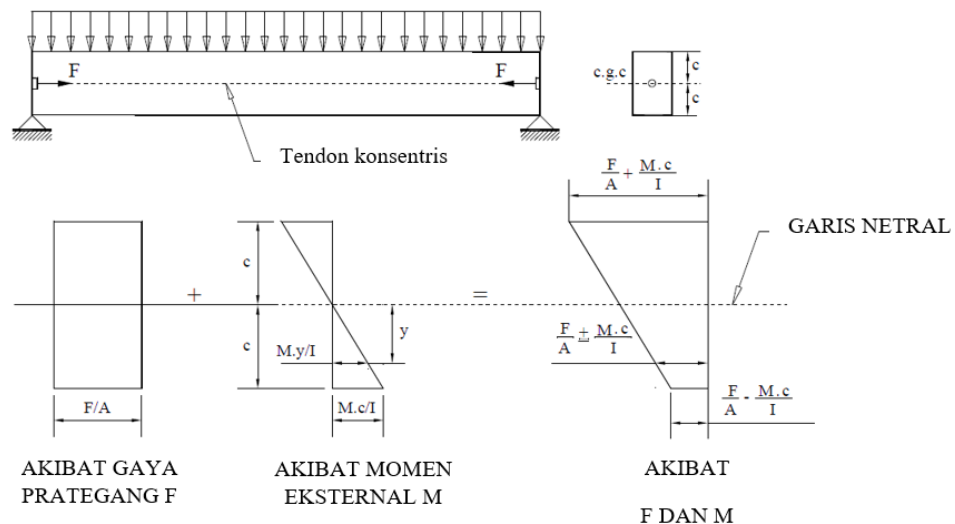
2.6.1 Prinsip Dasar Struktur Beton Prategang

Beton pratekan dapat didefinisikan sebagai beton yang diberikan tegangan tekan internal sedemikian rupa sehingga dapat mengeliminir tegangan tarik yang terjadi akibat beban eksternal sampai suatu batas tertentu.

Ada 3 (tiga) konsep yang dapat di pergunakan untuk menjelaskan dan menganalisa sifat-sifat dasar dari beton pratekan atau prategang:

1. Sistem Pratekan/Prategang untuk Mengubah Beton yang Getas Menjadi Bahan yang Elastis

Eugene Freyssinet menggambarkan dengan memberikan tekanan terlebih dahulu (pratekan) pada bahan beton yang pada dasarnya getas akan menjadi bahan yang elastis. Dengan memberikan tekanan (dengan menarik baja mutu tinggi), beton yang bersifat getas dan kuat memikul tekanan, akibat adanya tekanan internal ini dapat memikul tegangan tarik akibat beban eksternal. Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar dibawah ini.



Gambar 2.9 Konsep Prategang Menurut Eugene Freyssinet

Sumber : Buku Ajar Perencanaan Struktur Beton Prategang

Akibat diberi gaya tekan (gaya prategang) F yang bekerja pada pusat berat penampang beton akan memberikan tegangan tekan yang merata diseluruh penampang beton sebesar F/A , dimana A adalah luas penampang beton tersebut.

Akibat beban merata (termasuk berat sendiri beton) akan memberikan tegangan tarik dibawah garis netral dan tegangan tekan diatas garis netral yang besarnya pada serat terluar penampang adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan lentur : } f = \frac{M.c}{I} \quad (2.25)$$

Dimana :

M : momen lentur pada penampang yang ditinjau

c : jarak garis netral ke serat terluar penampang

I : momen inersia penampang.

Jika kedua tegangan akibat gaya prategang dan tegangan akibat momen lentur ini dijumlahkan, maka tegangan maksimum pada serat terluar penampang adalah sebagai berikut.

a. Diatas Garis Netral

$$f_{\text{Total}} = \frac{F}{A} + \frac{M.c}{I} \longrightarrow \text{tidak boleh melampaui tegangan hancur beton}$$

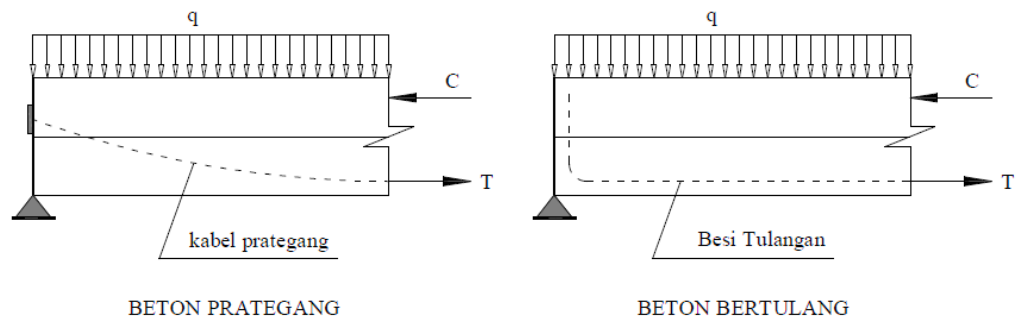
b. Dibawah Garis Netral

$$f_{\text{Total}} = \frac{F}{A} - \frac{M.c}{I} \geq 0 \longrightarrow \text{tidak boleh lebih kecil dari nol}$$

Jadi, dengan adanya gaya internal tekan ini, maka beton akan dapat memikul beban tarik.

2. Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton Mutu Tinggi

Konsep ini hampir sama dengan konsep beton bertulang biasa, yaitu beton prategang merupakan kombinasi kerja sama antara baja prategang dan beton, dimana beton menahan beban tekan dan baja prategang menahan beban tarik. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 2.10 Momen Tahanan Internal pada Beton Prategang dan Beton Bertulang

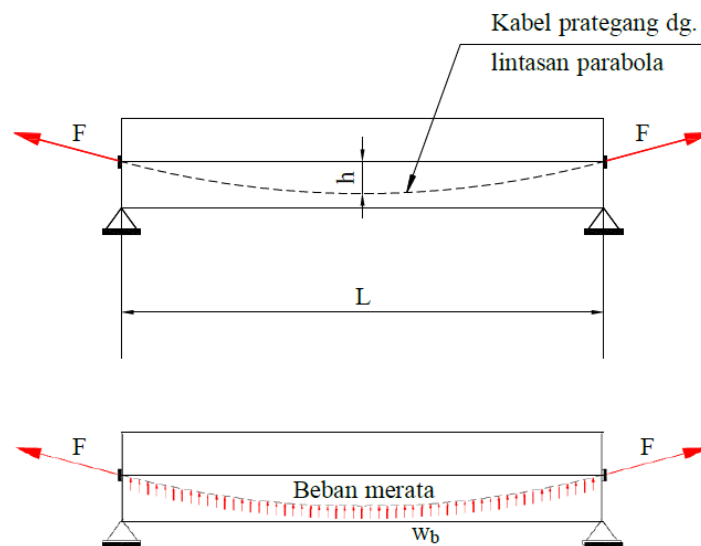
Sumber : Buku Ajar Perencanaan Struktur Beton Prategang

Pada beton prategang, baja prategang ditarik dengan gaya prategang T yang mana membentuk suatu kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan momen akibat beban luar. Sedangkan pada beton bertulang biasa, besi penulangan menahan gaya tarik T akibat beban luar, yang juga

membentuk kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan momen luar akibat beban luar.

3. Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban

Disini menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat kesetimbangan gaya-gaya pada suatu balok. Pada design struktur beton prategang, pengaruh dari prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri, sehingga batang yang mengalami lendutan seperti plat, balok dan gelagar tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi. Hal ini dapat dijelaskan sbagai berikut.



Gambar 2.11 Pembebanan Akibat Gaya Prategang F melalui Kabel Prategang dengan Lintasan Parabola

Sumber : Buku Ajar Perencanaan Struktur Beton Prategang

Suatu balok beton diatas dua perletakan (*simple beam*) yang diberi gaya prategang F melalui suatu kabel prategang dengan lintasan parabola. Beban akibat gaya prategang yang terdistribusi secara merata kearah atas dinyatakan sebagai berikut.

$$W_b = \frac{8 \times F \times h}{L^2} \quad (2.26)$$

Dimana :

W_b : beban merata kearah atas, akibat gaya prategang F

h : tinggi parabola lintasan kabel prategang

L : bentangan balok.

F : gaya prategang.

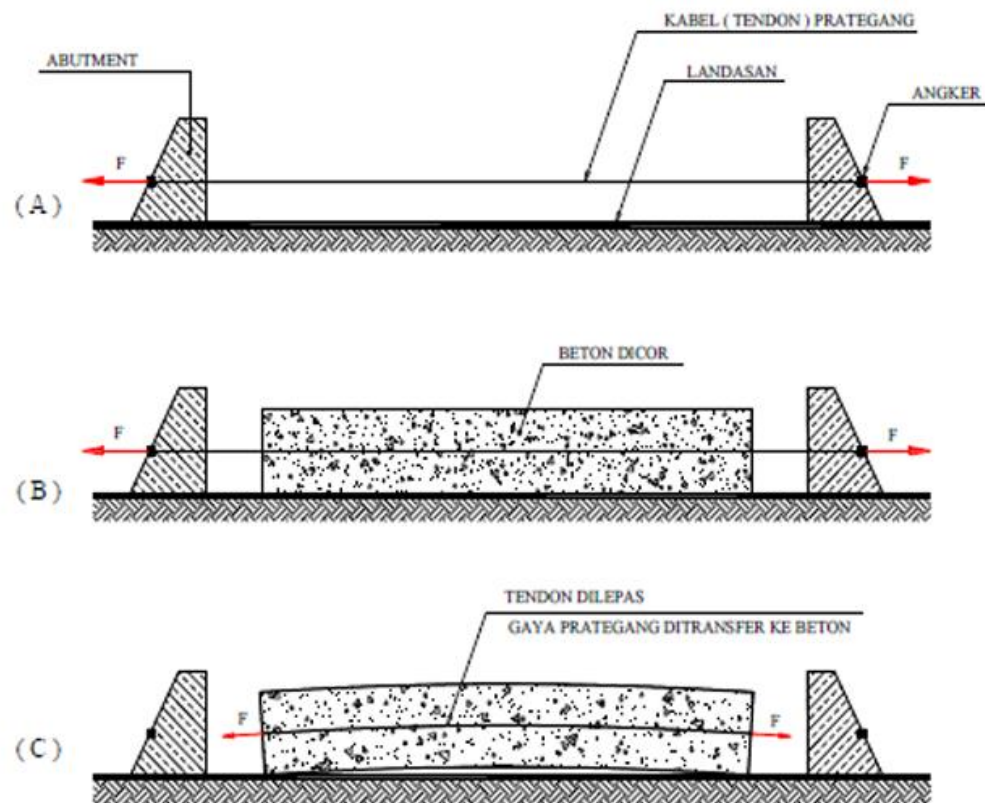
Jadi, beban merata akibat beban (mengarah kebawah) diimbangi oleh gaya merata akibat prategang W_b yang mengarah keatas.

2.6.2 Sistem Prategang dan Pengukuran

Sistem beton prategang adalah cara menegangkan atau menarik baja yang dikombinasikan dengan cara mengangkurkannya ke beton, termasuk beberapa rincian lain mengenai operasi dan cara kerjanya. Tekanan pada beton prategang yang diakibatkan dari penegangan tendon dibedakan menjadi dua system, yaitu pratarik (*pre-tensioning*) dan pascatarik (*post-tensioning*).

1. Pratarik

Dalam metode ini baja prategang diberi gaya prategang terlebih dahulu sebelum dicor, oleh karena itu disebut *pre-tensioning method*. Setelah beton mengering dan cukup umur kuat untuk menerima gaya prategang, tendon dipotong dan dilepas sehingga gaya prategang ditransferkan ke beton.



Gambar 2.12 Beton Prategang Pratarik

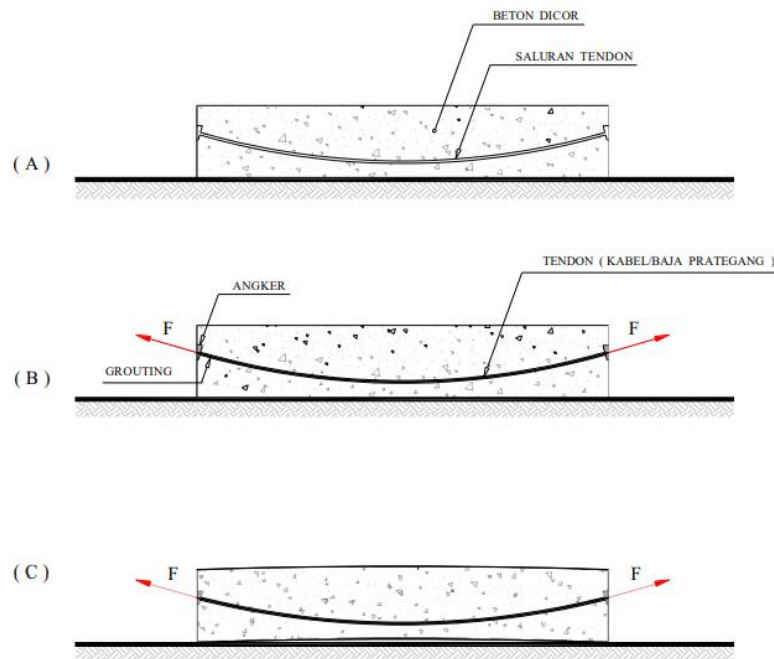
Sumber : Edward G. Nawy, 2001

Tahapan metode:

- Kabel prategang (tendon) yang diberi gaya prategang pada sebuah landasan yang rata, kemudian dipasang angkur pada suatu abutment tetap.
- Beton dicor pada cetakan (*formwork*) dan landasan yang telah disediakan sedemikian sehingga melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dibiarkan mengering.
- Setelah beton mengering dan cukup umur dan kuat untuk menerima gaya prategang, tendon dipotong dan dilepaskan, sehingga gaya prategang ditransfer ke beton. Gaya prategang yang telah ditransfer kepada balok beton akan melengkung ke atas sebelum menerima beban kerja. Setelah diberikan beban kerja balok beton tersebut akan rata.

2. Pascatarik

Prinsip dari pascatarik secara singkat dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 1 Beton Prategang Pascatarik

Sumber : Edward G. Nawy, 2001

- Dengan cetakan (*formwork*) yang telah disediakan lengkap dengan saluran/selongsong kabel prategang (*tendon duct*) yang dipasang melengkung sesuai bidang momen balok, beton dicor.
- Setelah beton cukup umur dan kuat memikul gaya prategang, tendon atau kabel prategang dimasukkan dalam selongsong (*tendon duct*), kemudian ditarik untuk mendapatkan gaya prategang. Metode pemberian gaya prategang ini, salah satu ujung kabel diangker, kemudian ujung lainnya ditarik (ditarik dari satu sisi). Ada pula yang ditarik di kedua sisinya dan diangker secara bersamaan. Setelah diangkur, kemudian saluran di grouting melalui lubang yang telah disediakan.
- Setelah diangkur, balok beton menjadi tertekan, jadi gaya prategang telah ditransfer kebeton. Karena tendon dipasang melengkung, maka akibat gaya prategang tendon memberikan beban merata kebalok yang arahnya keatas, akibatnya balok melengkung keatas.

2.6.3 Material Beton Prategang

2.6.3.1 Beton

Beton adalah campuran semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran (*admixture*) (SNI 03-2847, 2013). Kekuatan beton ditentukan oleh kuat tekan karakteristik beton pada usia 28 hari atau f'_c .

Beton yang lebih kuat biasanya dibutuhkan untuk pekerjaan prategang dibandingkan dengan beton bertulang. Menurut T. Y Lin & H. Burns (1993), praktik penggunaan beton di Amerika Serikat diharuskan untuk menggunakan kekuatan silinder beton umur 28 hari sebesar 28 hingga 55 Mpa untuk beton prategang, sementara untuk beton bertulang digunakan nilai sekitar 24 Mpa.

2.6.3.2 Baja Prategang

Baja prategang adalah elemen baja bermutu tinggi seperti kawat, strand, atau bundel elemen seperti itu yang digunakan untuk menyalurkan gaya prategang ke beton (SNI 03-2847, 2013). Untuk penggunaan pada beban layan yang tinggi, penggunaan baja tulangan (tendon) dan beton mutu tinggi akan lebih efisien. Hanya baja dengan tegangan elastis tinggi yang cocok digunakan pada beton prategang (Miswar Tumpu & Parea Rusan, 2020).

Baja (tendon) yang dipakai untuk beton prategang dalam prakteknya ada tiga macam, yaitu:

1. Kawat tunggal (*wires*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pratarik (*pre-tension*).
2. Kawat untai (*strand*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pascatarik (*post-tension*).
3. Kawat batangan (*bar*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pratarik (*pre-tension*).

Tabel 2.4 Tipikal Baja Prategang

Jenis Baja Prategang	Diameter (mm)	Luas (mm ²)	Beban Putus (kN)	Tegangan Tarik (MPa)
Kawat tunggal (<i>wire</i>)	3	7,1	13,5	1.900
	4	12,6	22,1	1.750
	5	19,6	31,4	1.600

Jenis Baja Prategang	Diameter (mm)	Luas (mm ²)	Beban Putus (kN)	Tegangan Tarik (MPa)
Untaian kawat (<i>strand</i>)	7	38,5	57,8	1.500
	8	50,3	70,4	1.400
	9,8	54,7	102	1.860
	12,7	100	184	1.840
	15,2	143	250	1.750
Kawat batangan (<i>bar</i>)	23	415	450	1.080
	26	530	570	1.080
	29	660	710	1.080
	32	804	870	1.080
	38	1.140	1.230	1.080

Sumber : Buku Ajar Perencanaan Struktur Beton Prategang

Miswar Tumpu & Parea Rusan (2020), mengemukakan bahwa jenis-jenis lain tendon yang sering digunakan untuk beton prategang pada sistem *pre-tension* adalah *seven-wire* strand dan *single-wire*. Untuk *seven-wire* ini, satu bendel kawat terdiri dari 7 buah kawat, sedangkan *single wire* terdiri dari kawat tunggal.

Sedangkan untai tujuh kawat yang biasa digunakan untuk sistem prategang menurut spesifikasi (ASTM A416 -12a, 2012) memiliki kekuatan batas 1720 Mpa atau 1860 Mpa. Sifat-sifat strand stress-relieved dengan tujuh kawat tanpa pelapisan didaftarkan ada Tabel berikut.

Tabel 2.5 Sifat-sifat *Strand Stress-relieved* (7 Kawat Tanpa Pelapisan)

Diameter Nominal (mm)	Kekuatan Putus (kN)	Luas Nominal Strand (mm ²)	Beban Minimum pada Pemuaian 1% (kN)
Derajat 1720 Mpa			
6,35	40,0	23,22	34,0
7,94	64,5	37,42	54,7
9,53	89,0	51,61	75,6
11,11	120,1	69,68	102,3
12,70	160,1	92,90	136,2
15,24	240,2	139,35	204,2
Derajat 1860 Mpa			
9,53	102,3	54,84	87,0
11,11	137,9	74,19	117,2
12,70	183,7	98,71	156,1
15,24	260,7	140,00	221,5

Sumber : Desain Struktur Beton Prategang, Jilid I

2.6.3.3 Grouting

Grouting adalah bahan pengisi selubung baja prategang yang dimasukkan ke dalam pembungkus *strand* yang terbuat dari bahan plat galvanis pada beton prategang yang menggunakan metode pasca tarik. *Grouting* terdiri dari semen *portland* dan air atau semen *portland*, pasir, dan air (SNI 03-2847, 2013).

2.6.3.4 Selubung (*Sheating*)

Selubung adalah material yang membungkus baja prategang yang mencegah lekatan baja prategang dengan beton yang mengelilinginya. Selubung tersebut mengandung pelapis (*coating*) yang berguna untuk mencegah korosi (SNI 03-2847, 2013).

2.6.4 Perhitungan Gaya Prategang

2.6.4.1 Gaya Prategang Awal

1. Saat Transfer

Gaya prategang saat awal (*transfer*), yaitu pemeriksaan tegangan saat pelimpahan gaya prategang (penarikan tendon pada sistem pascatarik, pemotongan tendon pada sistem pratarik). Beban yang diperhitungkan berupa gaya prategang awal (P_t) dan beban berat sendiri (M_{bs}). Persamaan yang digunakan sebagai berikut.

Tegangan di serat atas,

$$0,5 \times \sqrt{f_{ci}} = -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} \quad (2.27)$$

Tegangan di serat bawah,

$$-0,60 \times f_{ci}' = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b} \quad (2.28)$$

2. Saat Layan

Saat masa layan (*service*) adalah pemeriksaan pada saat seluruh beban transversal sudah bekerja. Beban-beban yang diperhitungkan berupa gaya prategang efektif (P_{eff}) dan seluruh beban eksternal yang telah bekerja.

Persamaan yang digunakan sebagai berikut.

Tegangan di serat atas,

$$-0,45 f_c' = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} - \frac{M_{TD}}{W_a} \quad (2.29)$$

Tegangan di serat bawah,

$$0,50 \times \sqrt{f_c'} = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b} + \frac{M_{TD}}{W_b} \quad (2.30)$$

2.6.4.2 Penentuan Letak, Batas Aman, dan Jumlah Tendon

Digunakan kabel yang terdiri dari beberapa kawat baja untai (*strands cable*) standar VSL. Jumlah *strand* yang diperlukan yaitu sebagai berikut.

$$n_s = \frac{P_t}{0,8 \times P_{bs}} \quad (2.31)$$

Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% *Jacking Force*),

$$p_o = \frac{P_t}{(n_t \times p_{b1})} \quad (2.32)$$

Dimana :

p_{b1} : beban satu strand

P_{bs} : beban putus minimal satu *strands*

Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking*, sebagai berikut.

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs1} \quad (2.33)$$

Pada kondisi awal agar pengaruh beban kerja dan pusat tidak jatuh di garis kern bawah, maka garis cgs tidak boleh ditempatkan dibawah kern dengan jarak minimal:

$$a_2 = \frac{M_c}{T_1} \quad (2.34)$$

Dimana :

a_2 : Jarak titik berat tendon di bawah batas bawah (k_b)

M_c : Momen akibat berat sendiri *girder*

T_1 : Gaya prategang awal

Persamaan lintasan tendon, sebagai berikut.

$$Y = -\frac{4 f_1 \times (L-X)}{L^2} \quad (2.35)$$

Dimana :

f_1 : eksentrisitas bawah tendon

L : panjang jembatan

2.6.5 Kehilangan Gaya Prategang

Prategang efektif pada beton mengalami pengurangan secara berangsur-angsur sejak tahap transfer yang diakibatkan oleh beberapa sebab. Secara umum ini dinyatakan sebagai kehilangan prategang. Suatu perkiraan yang cukup baik atas besarnya kehilangan prategang diperlukan dari sudut pandang desain (N. Krishna Raju, 1988). Kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2, yaitu kehilangan langsung (*immediate*) dan kehilangan yang bergantung dengan waktu (*time depending loss*).

Kehilangan gaya prategang langsung dapat diakibatkan oleh beberapa hal, antara lain:

1) Gesekan angkur

Kehilangan gaya akibat gesekan angkur diperhitungkan sebesar 3% dari gaya prestress akibat *jacking*:

$$P_o = 97\% \times P_j \quad (2.36)$$

2) Gesekan Kabel

Kehilangan gaya akibat gesekan kabel,

$$P_x = P_o \times e^{-\mu^*(\alpha + \beta * L_x)} \quad (2.37)$$

Keterangan :

e = bilangan natural

μ = koefisien gesek

β = bilangan wobble

L_x = panjang bentang

Tabel 2.6 Koefisien Gesek

<i>Type of Duct or Tendon Support</i>	<i>Typical Values for μ</i>
<i>Bright or zinc-coated metal duct</i>	0,20
<i>Lead-coated metal duct</i>	0,15
<i>Unlined preformed holes in concrete</i>	0,50
<i>External tendons over machined cast steel saddles fixed to concrete</i>	0,15
<i>Bars, without ducts, greased and wrapped with tape prior to concreting</i>	0,20

Sumber : NAASRA Bridge Design Specification, Table 6.6

Tabel 2.7 Koefisien Wobble

<i>Type of Duct or Tendon Support</i>	<i>Typical Values for β</i>
<i>Ducts containing tendons other than bars:</i>	
<i>(a) 50 mm and less internal diameter</i>	0,016
<i>(b) Over 50 mm and up to 90 mm diameter</i>	0,012
<i>(c) Over 90 mm internal diameter</i>	0,008
<i>Ducts of any diameter containing bars</i>	0,008
<i>Unlined holes in concrete formed by steel tubing or bars</i>	0,008
<i>Bars without ducts, greased and wrapped with tape prior to concreting</i>	0,008

Sumber : NAASRA Bridge Design Specification, Table 6.7

3) Pemendekkan elastis

Tegangan baja *pre-stress* sebelum *loss of prestress* (di tengah bentang),

$$\sigma_{pi} = \frac{ns \times Pbs}{A_t} \quad (2.38)$$

Keterangan :

A_t = Luas tampang tendon baja prestress

ns = Jumlah total strands

Pbs = Beban putus satu strands

Kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik dengan memperhitungkan pengaruh berat sendiri,

$$\Delta\sigma_{pe}' = \frac{\sigma_{pi} \times n \times K_e}{1 + (n \times K_e)} \quad (2.39)$$

Keterangan :

n = Modulus rasio antara baja prategang dan *girder*

$$K_e = \frac{A_t}{A \times \left(\frac{e^2}{i^2}\right)} \quad (2.40)$$

Tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prategang,

$$\Sigma b_t = \frac{\Delta\sigma_{pe}'}{n} - \frac{M_{balok} \times e_s}{I_x} \quad (2.41)$$

Keterangan:

e_s = jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat *box girder*

I_x = Momen inersia tampang *box girder*

Kehilangan tegangan baja oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri,

$$\Delta\sigma_{pe} = \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{bt} \quad (2.42)$$

Loss of prestress akibat pemendekan elastis:

$$\Delta P_e = \Delta\sigma_{pe} \times A_t \quad (2.43)$$

4) Pengangkuran

Loss of prestress akibat angkur,

$$\Delta P = 2 \times L_{max} \times \tan \omega \quad (2.44)$$

$$P'_{\max} = P_o - \frac{\Delta P}{2} \quad (2.45)$$

$$P_{\max} = P'_{\max} - \Delta P_e \quad (2.46)$$

5) Pengaruh susut

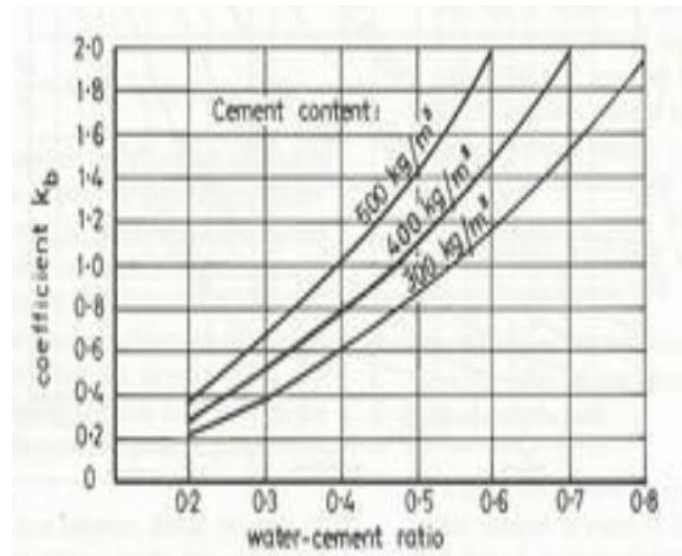
Berdasarkan Tabel 6.4 pada *NAASRA Bridge Design Specification*, regangan dasar susut (*basic shrinkage strain*) ditentukan sebagai berikut:

Tabel 2.8 Nilai Koefisien Regangan Dasar Susut (ϵ_b)

<i>Climatic Condition</i>	<i>Avg Relative Humidity As Percentage (%)</i>	<i>Basic Shrinkage Strains ϵ_b</i>
<i>Dry air</i>	< 50	600×10^{-6}
<i>Generally in the open air, and not subject to periods of prolonged high temperatur or low humidity</i>	50 to 75	400×10^{-6}
<i>In very humid air, e.g. over water</i>	> 75	200×10^{-6}
<i>In water</i>	100	0

Sumber : *NAASRA Bridge Design Specification, Table 6.4*

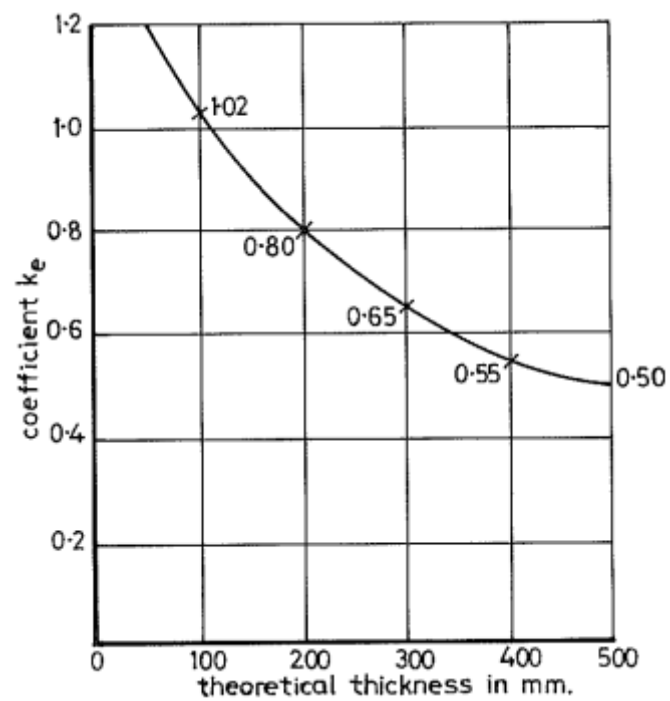
Koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen (*water cement ratio*) untuk beton mutu tinggi (k_b) dengan faktor air semen $W = 0,40$, dan *Cement concrete* = $4,5 \text{ kN/m}^3$, ditentukan sebagai berikut:



Gambar 2.13 Nilai Koefisien K_b

Sumber : *NAASRA Bridge Design Specification*, figure 6.1

Koefisien yang tergantung pada tebal teoritis (em):



Gambar 2.14 Nilai Koefisien K_e

Sumber : *NAASRA Bridge Design Specification*, figure 6.2

$$e_m = 2 \times \frac{A}{K} \quad (2.47)$$

Koefisien yang tergantung pada luas tulangan baja memanjang non prategang:

$$k_p = \frac{100}{100 + 20 p} \quad (2.48)$$

Dimana:

$p = 0,50\%$ (presentase luas tulangan memanjang terhadap luas tampang balok)

$$\Delta \epsilon_{su} = \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \quad (2.49)$$

Tegangan susut,

$$\sigma_{sh} = \Delta \epsilon_{su} \times E_s \quad (2.50)$$

Keterangan :

$\Delta \epsilon_{su}$ = regangan susut

E_s = modulus elastis baja prategang

6) Pengaruh rayapan

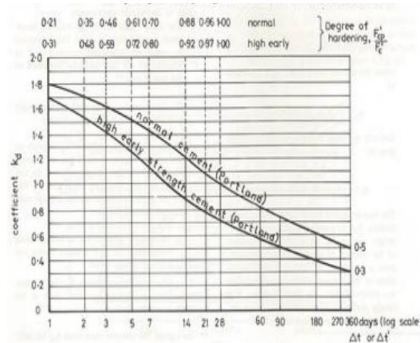
Koefisien yang tergantung pada kelembaban udara, ditetapkan sebagai berikut:

Tabel 2.9 Nilai Koefisien k_c

<i>Climatic condition</i>	<i>Average Relative Humidity As a Percentage (%)</i>	k_c
<i>Dry air</i>	< 50	3,0
<i>Generally in the open air, and not subject to periods of prolonged high temperatur or low humidity</i>	50 to 75	2,5
<i>In very humid air, e.g over water</i>	> 75	1,5
<i>In water</i>	100	1,0

Sumber : NAASRA Bridge Design Specification, Table 6.5

Koefisien yang tergantung pada derajat pengerasan beton saat dibebani dan pada suhu rata-rata di sekelilingnya selama pengerasan beton (k_d):



Gambar 2.15 Nilai Koefisien K_d

Sumber : *NAASRA Bridge Design Specification, Table 6.5*

Koefisien yang tergantung pada waktu dengan tipe semen normal diperoleh nilai $k_{tn} = 0,2$

$$\varepsilon_{cr} = (f_c / E_{balok}) \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_{tn} \quad (2.51)$$

keterangan :

f_c = tegangan balok

Tegangan akibat creep,

$$\sigma_{cr} = \varepsilon_{cr} \times E_s \quad (2.52)$$

Keterangan:

ε_{cr} = regangan akibat creep

E_s = modulus elastis baja prategang

Kehilangan gaya prategang akibat susut dan rangkak,

$$\Delta\sigma_{sc} = \sigma_{cr} + \sigma_{sh} \quad (2.53)$$

$$\text{Kehilangan gaya prategang total} = \left(1 - \frac{P_{eff}}{P_j}\right) \times 100 \% \quad (2.54)$$

2.6.6 Tegangan Akibat Gaya Prategang

Menurut RSNI T-12-2004, tegangan beton sesaat setelah penyaluran gaya prategang (sebelum terjadi kehilangan gaya prategang sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:

1. Tegangan serat tekan terluar harus $\leq 0,60 f_{ci}$;

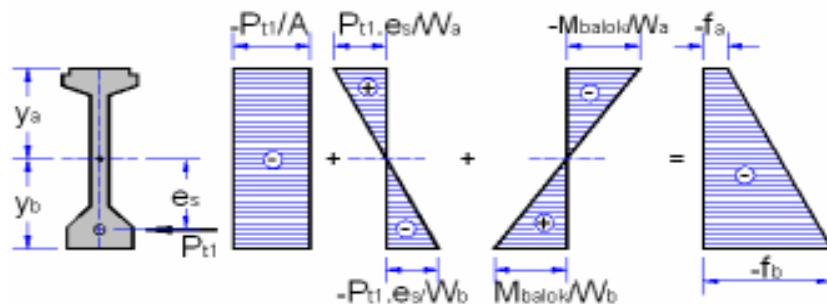
2. Tegangan serat tarik $\leq 0,50 \sqrt{f_{ci}}$ apabila serat terluar mengalami tegangan tarik;
3. Apabila serat terluar pada ujung komponen struktur yang didukung sederhana dan mengalami tegangan tarik, maka tegangan serat tarik $\leq 0,25 \sqrt{f_{ci}}$.

Tegangan beton pada kondisi beban layan (setelah memperhitungkan semua kehilangan tegangan) tidak boleh melebihi nilai sebagai berikut:

1. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati, dan beban hidup $\leq 0,45 f_c'$; dan
 2. Tegangan serat tarik terluar yang pada awalnya mengalami tekan $\leq 0,50 \sqrt{f_c'}$
- a. Tegangan saat transfer

$$\text{Tegangan beton di serat atas, } f_a = -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} \quad (2.55)$$

$$\text{Tegangan beton di serat bawah, } f_b = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b} \quad (2.56)$$



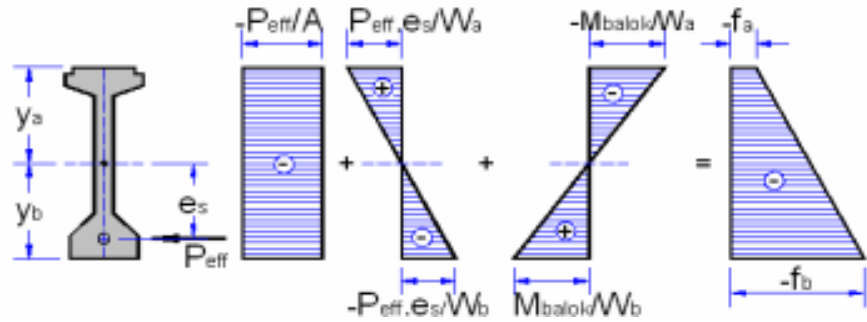
Gambar 2.16 Skema Tegangan Saat Transfer

Sumber : RSNI T-12-2004

- b. Tegangan saat *loss of prestress*

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} \quad (2.57)$$

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b} \quad (2.58)$$

Gambar 2.17 Skema Tegangan Setelah *Loss of Prestress*

Sumber : RSNI T-12-2004

c. Tegangan setelah pembetonan (beton muda)

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok+plat}}{W_a} \quad (2.59)$$

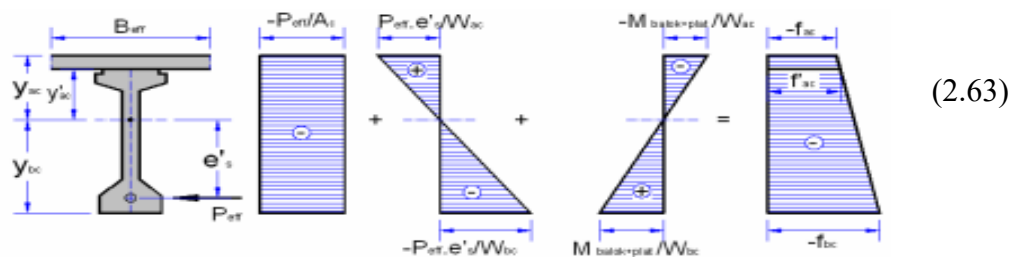
$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok+plat}}{W_a} \quad (2.60)$$

d. Tegangan setelah plat dan balok menjadi komposit

$$\text{Tegangan di serat atas plat, } f_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad (2.61)$$

$$\text{Tegangan di serat atas balok, } f'_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok+plat}}{W'_c} \quad (2.62)$$

$$\text{Tegangan di serat bawah balok, } f_{bc} = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{balok+plat}}{W_{bc}}$$



Gambar 2.18 Skema Tegangan Saat Balok dan Pelat Menjadi Komposit

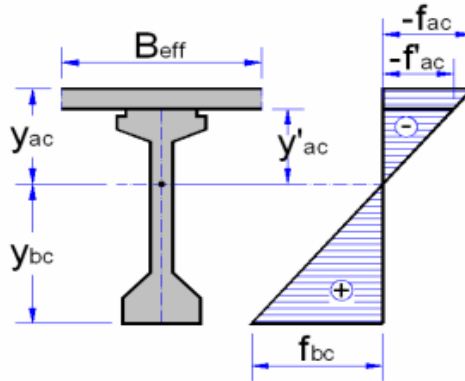
Sumber : RSNI T-12-2004

e. Tegangan akibat beban

1) Akibat beban sendiri

$$f_a = -\frac{M_{MS}}{W_a} \quad (2.64)$$

$$f_b = \frac{M_{MS}}{W_b} \quad (2.65)$$



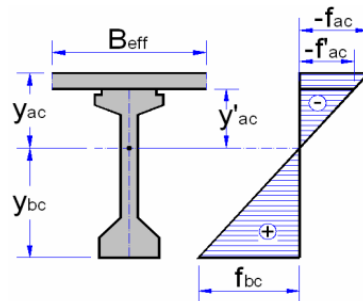
Gambar 2.19 Skema Tegangan Akibat Berat Sendiri

Sumber : RSNI T-12-2004

2) Akibat beban mati tambahan

$$f_a = - \frac{M_{MA}}{W_a} \quad (2.66)$$

$$f_b = \frac{M_{MA}}{W_b} \quad (2.67)$$



Gambar 2.20 Skema Tegangan Akibat Beban Mati Tambahan

Sumber : RSNI T-12-2004

3) Akibat susut dan rangkai

Gaya internal yang timbul akibat susut (*NAASRA Bridge Design*

Specification, 1976) dinyatakan dengan persamaan:

$$P_s = A_{plat} \times E_{plat} \times \Delta \epsilon_{su} \times n \times [(1 - e^{-c_f}) / c_f] \quad (2.68)$$

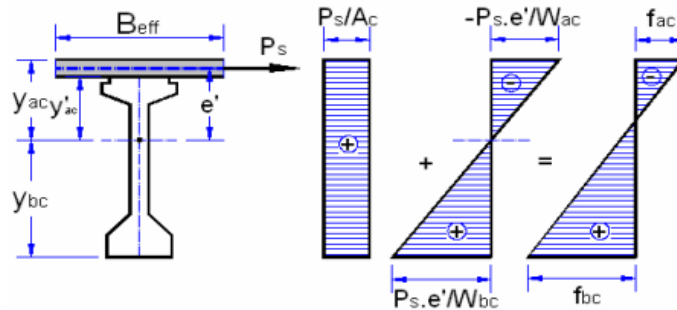
$$c_f = k_d \times k_d \times k_d \times k_d \times (1 + k_{tn}) \quad (2.69)$$

Tegangan akibat susut yang terjadi:

$$f_{ac} = \frac{P_s}{A_c} - \frac{P_s \times e'}{W_{ac}} \quad (2.70)$$

$$f'_{ac} = \frac{P_s}{A_c} - \frac{P_s \times e'}{W'_{ac}} \quad (2.71)$$

$$f_{bc} = \frac{P_s}{A_c} + \frac{P_s \times e'}{W_{bc}} \quad (2.72)$$



Gambar 2.21 Skema Tegangan Akibat Susut

Sumber : RSNI T-12-2004

Tegangan akibat rangkak (*creep*) (*NAASRA Bridge Design Specification*, 1976) dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma_{cr} = (1 - e^{-ct}) \times (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (2.73)$$

Tegangan pada balok sebelum *loss of prestress*:

$$f_{ac} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad (2.74)$$

$$f'_{ac} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W'_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad (2.75)$$

$$f_{bc} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W_{bc}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{bc}} \quad (2.76)$$

Tegangan pada balok setelah *loss of prestress*:

$$f_{ac} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad (2.77)$$

$$f'_{ac} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W'_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad (2.78)$$

$$f_{bc} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_{bc}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{bc}} \quad (2.79)$$

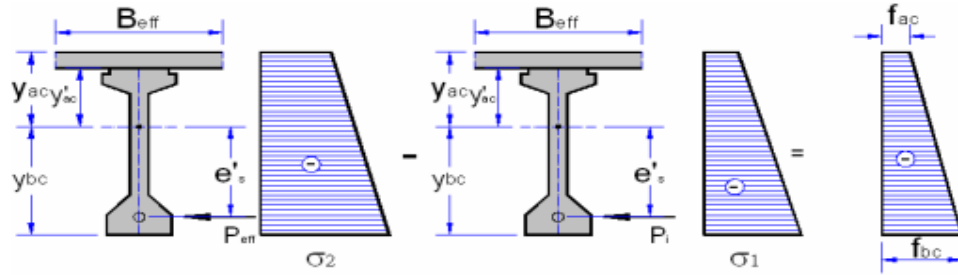
Tegangan *service* akibat beban mati dan beban mati tambahan:

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_a} - \frac{MMS+MMA}{W_a} \quad (2.80)$$

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e'}{W_b} + \frac{MMS+MMA}{W_b} \quad (2.81)$$

Tegangan akibat susut dan rangkak dinyatakan sebagai berikut:

$$f = f_{susut} + f_{rangkak} \quad (2.82)$$



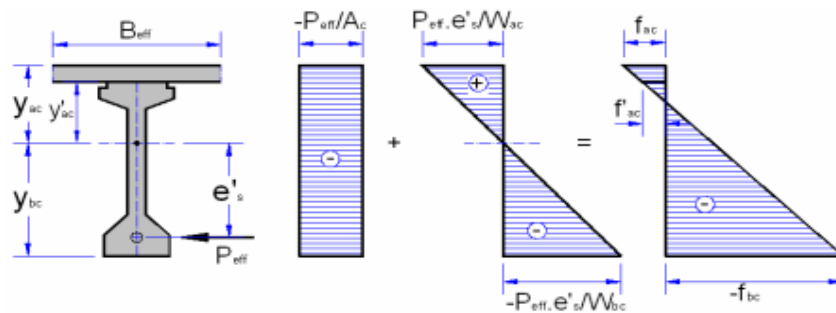
Gambar 2.22 Skema Tegangan Akibat Rangkak

Sumber : RSNI T-12-2004

4) Akibat prategang

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} \quad (2.83)$$

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_b} \quad (2.84)$$



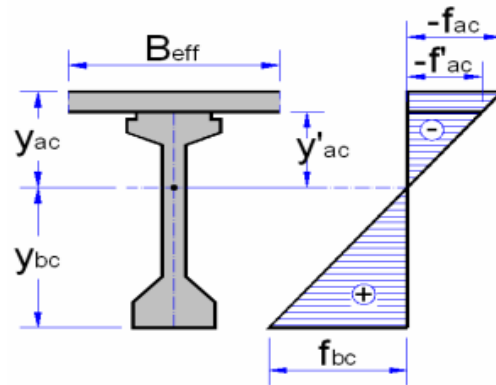
Gambar 2.23 SkemaTegangan Akibat Gaya Prategang

Sumber : RSNI T-12-2004

5) Akibat lajur “D”

$$f_a = -\frac{M_{TD}}{W_a} \quad (2.85)$$

$$f_b = \frac{M_{TD}}{W_b} \quad (2.86)$$



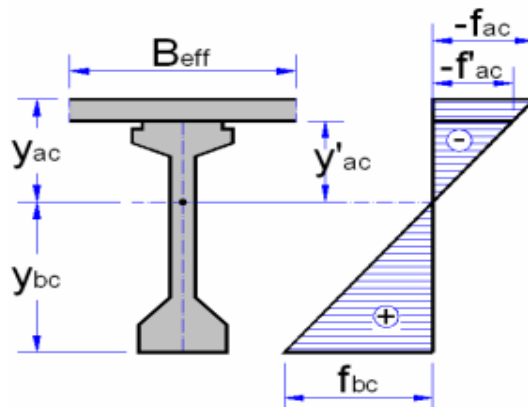
Gambar 2.24 Skema Tegangan Akibat Beban Lajur "D"

Sumber : RSNI T-12-2004

6) Akibat beban rem

$$f_a = - \frac{M_{TB}}{W_a} \quad (2.87)$$

$$f_b = \frac{M_{TB}}{W_b} \quad (2.88)$$



Gambar 2.25 Skema Tegangan Akibat Gaya Rem

Sumber : RSNI T-12-2004

7) Akibat beban angin

$$f_a = - \frac{M_{EW}}{W_a} \quad (2.89)$$

$$f_b = \frac{M_{EW}}{W_b} \quad (2.90)$$

A	= luas penampang balok
A_{plat}	= luas penampang plat
c_f	= residual creep factor
e_s	= jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat <i>box girder</i>
e	= bilangan natural
P_{eff}	= gaya prategang efektif
W_a	= tahanan momen di serat atas
W_b	= tahanan momen di serat bawah
M_{bs}	= momen akibat balok prategang
M_{MS}	= momen akibat beban sendiri
M_{MA}	= momen akibat beban mati tambahan
M_{TD}	= momen akibat beban lajur “D”
M_{TP}	= momen akibat beban pejalan kaki
M_{TB}	= momen akibat gaya rem
M_{EW}	= momen akibat beban angin
M_{EQ}	= momen akibat beban gempa

2.6.7 Lendutan

Berdasarkan SNI 1725 (2016), batas lendutan izin jembatan jalan raya ditetapkan sebesar $L/250$. Hal ini juga sejalan dengan RSNI T-12-2004 yang mensyaratkan kriteria kekakuan untuk menjaga kenyamanan pengguna dan durabilitas elemen struktural jembatan.

Lendutan terhadap beban merata,

$$\delta = \frac{5 \times Q \times L^4}{384 \times E_c \times I_x} \quad (2.96)$$

Lendutan terhadap beban terpusat,

$$\delta = \frac{P \times L^3}{48 \times E_c \times I_x} \quad (2.97)$$

Keterangan:

Q	= beban merata
P	= beban terpusat
E_c	= modulus elastis beton
I_x	= inersia

L = panjang bentang jembatan

2.6.8 Tinjauan Ultimit

Tinjauan ultimit yang dihitung hanya kapasitas momen ultimit positif karena tendon melewati bawah garis netral. Kuat leleh baja prategang (f_{ps}) pada keadaan ultimit, ditetapkan:

- 1) untuk nilai $L / H \leq 35$;
- 2) $f_{ps} = f_{eff} + 150 + \frac{f_c}{100 \times p_p}$ MPa; dan
- 3) f_{ps} Harus $< f_{eff} + 400$ MPa dan $< 0,80 f_{py}$

$$\text{Momen nominal, } M_n = A_{ps} \times f_{ps} \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.98)$$

Keterangan:

A_{ps} = luas penampang tendon baja prategang

f_{ps} = kuat leleh baja prategang

d = tinggi

a = luas

2.6.9 Pembesian *End Block*

Rasio perbandingan lebar plat angkur untuk sengkang arah vertikal dan horisontal,

$$r_a = \frac{a_1}{a} \quad \text{dan} \quad r_b = \frac{b_1}{b} \quad (2.99)$$

Bursting force untuk sengkang arah vertikal dan horisontal,

$$P_{bta} = 0,30 \times (1 - r_a) \times P_j \quad \text{dan} \quad P_{btb} = 0,30 \times (1 - r_b) \times P_j \quad (2.100)$$

Luas tulangan sengkang arah vertikal dan horisontal yang diperlukan,

$$A_{ra} = \frac{P_{bta}}{0,85 \times f_s} \quad \text{dan} \quad A_{rb} = \frac{P_{btb}}{0,85 \times f_s} \quad (2.101)$$

Tegangan ijin baja sengkang,

$$f_s = 0,578 \times f_y \quad (2.102)$$

Luas penampang sengkang,

$$A_s = 2 \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad (2.103)$$

Jumlah sengkang arah vertikal dan horisontal yang diperlukan,

$$n = \frac{A_{ra}}{A_s} \quad \text{dan} \quad n = \frac{A_{rb}}{A_s} \quad (2.104)$$

2.6.10 Tinjauan Terhadap Geser

$$\text{Sudut kemiringan tendon, } a = \arctan x \frac{4 \times f \times (L-2X)}{L^2} \quad (2.105)$$

$$\text{Komponen gaya arah x, } P_x = P_{\text{eff}} \times \cos a \quad (2.106)$$

$$\text{Komponen gaya arah y, } P_y = p_{\text{eff}} \times \sin a \quad (2.107)$$

$$\text{Resultan gaya geser, } V_r = V - P_y \quad (2.108)$$

$$\text{Tegangan geser yang terjadi, } f_v = \frac{V_r \times S_x}{b \times I_x} \quad (2.109)$$

$$\text{Tegangan beton di serat atas, } f_a = -\frac{P_x}{A} + \frac{P_x \times e}{W_a} - \frac{M}{W_a} \quad (2.110)$$

$$\text{Sudut bidang geser, } \gamma = \frac{1}{2} \times \arctan \frac{2f_v}{f_a} \quad (2.111)$$

$$\text{Jarak sengkang yang diperlukan, } a_s = f_a \times \frac{at}{f_v \times b \times \tan y} \quad (2.112)$$

$$\text{Tegangan beton di serat bawah, } f_b = -\frac{P_x}{A} + \frac{P_x \times e}{W_b} - \frac{M}{W_b} \quad (2.113)$$

$$\text{Sudut bidang geser, } \gamma = \frac{1}{2} \times \arctan \frac{2f_v}{f_b} \quad (2.114)$$

$$\text{Jarak sengkang yang diperlukan, } a_s = f_b \times \frac{at}{f_v \times b \times \tan y} \quad (2.115)$$