

BAB 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/m³
- Beton prategang 25,50 kN/m³
- Baja bertulang 7,85 kN/m³
- Air 10 kN/m³

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 ^S _{MS}	K ^U _{MS}	
		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.

a. Beban Lajur “D”

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

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m, } q = 9,0 \text{ kPa} \quad 2-1$$

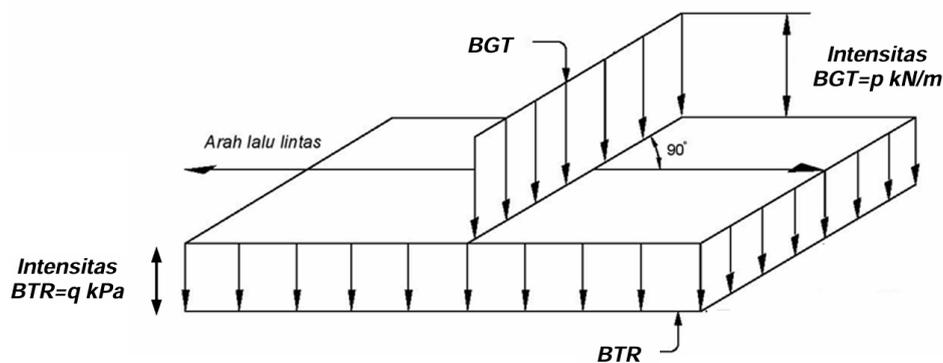
$$\text{Jika } L \geq 30 \text{ m, } q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad 2-2$$

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

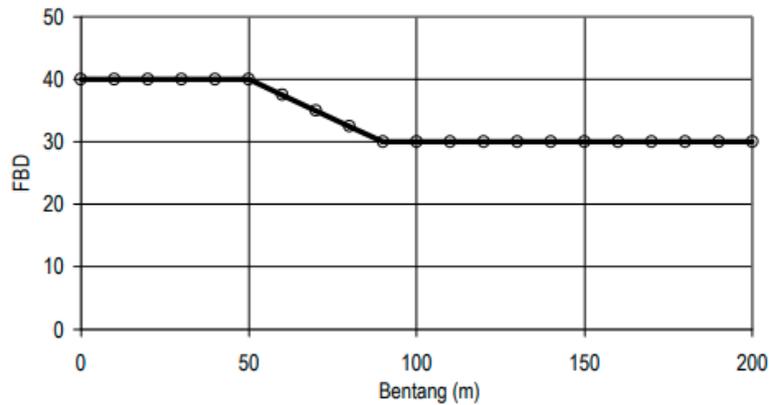
(sumber : SNI 1725:2016)

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

$$DLA = 0,4 \quad \text{untuk } L \leq 50 \text{ m} \quad 2-3$$

$$DLA = 0,4 - 0,0025 \times (L - 50) \quad \text{untuk } 50 < L < 90 \text{ m} \quad 2-4$$

$$DLA = 0,3 \quad \text{untuk } L \geq 90 \text{ m} \quad 2-5$$



Gambar 2.2 Grafik Faktor Beban Dinamis (sumber : SNI 1725:2016)

Beban merata pada *PCI girder*, $Q_{TD\ PCI} = q \times s$ 2-6

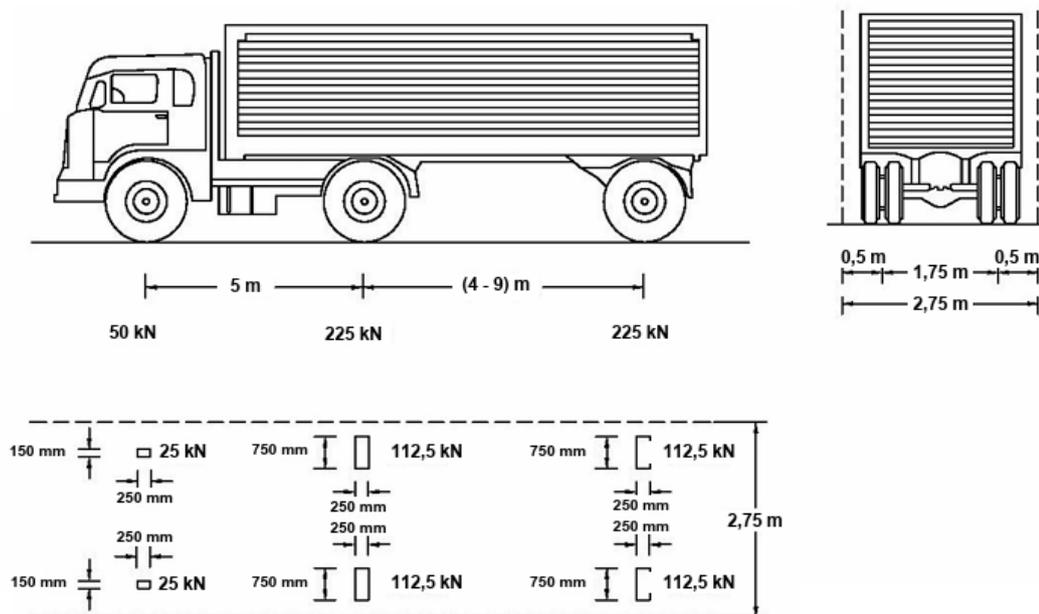
Beban merata pada *box girder*, $Q_{TD\ Box} = \frac{q \times (B+5,5)}{2}$ 2-7

Beban terpusat pada *PCI girder*, $P_{TD\ PCI} = (1 + DLA) \times p \times s$ 2-8

Beban terpusat pada *box girder*, $P_{TD\ Box} = \frac{(1+DLA) \times p \times (B+5,5)}{2}$ 2-9

b. 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)

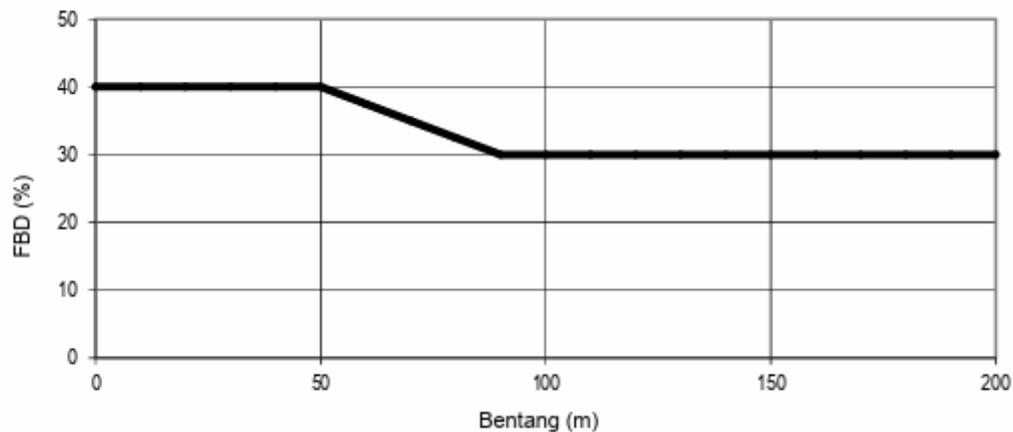
Beban hidup pada lantai jembatan berupa beban roda ganda oleh truk (beban T) yang besarnya, $T = 100 \text{ kN}$

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 Beban Pejalan Kaki (TP)

Semua komponen trotoar yang lebih lebar dari 600 mm harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan pada masing-masing lajur kendaraan. Jembatan pejalan kaki dan trotoar harus direncanakan untuk memikul beban per m^2 dari luas yang dibebani.



Gambar 2.4 Pembebanan untuk pejalan kaki (*sumber : SNI 1725:2016*)

$$\text{Untuk } A < 10 \text{ m}^2, q = 0,5 \text{ kPa} \quad 2-11$$

$$\text{Untuk } 10\text{m}^2 < A < 100 \text{ m}^2, q = 5,33 \times (A - 10) \text{ kPa} \quad 2-12$$

$$\text{Untuk } A > 100 \text{ m}^2, q = 2 \text{ kPa} \quad 2-13$$

Pembebanan untuk trotoar jembatan,

$$Q_{TP} = q \times b_t \quad 2-14$$

Keterangan:

b_t = lebar trotoar

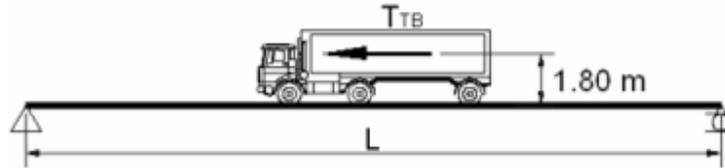
q = intensitas beban pada trotoar

2.2.5 Gaya Rem

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

- a. 25% dari berat gandar truk desain; atau
- b. 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 2.5 Pembebanan Gaya Rem (*sumber : SNI 1725:2016*)

2.2.6 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:

$$Q_{EW} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{x} \cdot T_{EW} \quad 2-15$$

dimana:

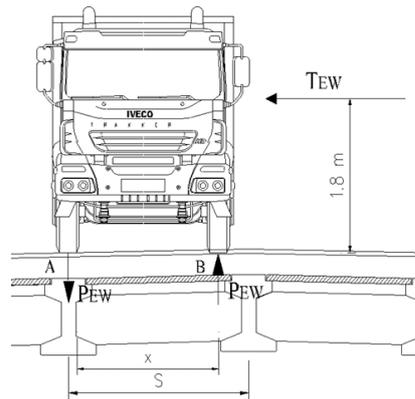
Q_{EW} = Beban angin (kN/m)

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 2.6 Pembebanan Beban Angin Terhadap Balok Prategang
(sumber : SNI 1725:2016)

2.2.7 Beban Gempa

Jembatan yang direncanakan harus memiliki kemungkinan kecil untuk runtu 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 :

$$T_{EQ} = 0,01 \times W_t \quad 2-16$$

dimana:

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

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

2.2.8 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.

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:

$$t_s \geq 200 \text{ mm} \quad 2-17$$

$$ts \geq (100 + 40 l) \text{ mm} \quad 2-18$$

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,

$$\rho_{min} = 1,0 / fy \quad 2-19$$

$$\rho_b = \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{fy} \frac{600}{600 + fy} \quad 2-20$$

$$\rho_{maks} = 0,75 \times \rho_b \quad 2-21$$

- b. Menghitung momen nominal,

Momen nominal diperoleh dari rumus berikut:

$$Mn = Mu / \phi \quad 2-22$$

dengan,

ϕ = faktor reduksi yang besarnya 0,80

- c. Menghitung tahanan momen nominal,

$$Rn = Mn / b \cdot d^3 \quad 2-23$$

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,

$$R_{maks} = \rho_{maks} \cdot fy \cdot \left(1 - \frac{1/2 \rho_{maks} \cdot fy}{0,85 \cdot f_c'} \right) \quad 2-24$$

- e. Kontrol $R_n > R_{maks}$,

- f. Menghitung rasio tulangan yang diperlukan,

$$\rho = 0,85 \frac{f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f_c'}} \right) \quad 2-25$$

- 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,

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad 2-26$$

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

$$\frac{A_s}{b \cdot d} \geq \frac{1,0}{f_y} \quad 2-27$$

- i. Menentukan jarak antar tulangan,

$$S = \left(\frac{1}{4} \pi \cdot d_t^2 \cdot b \right) / A_s \quad 2-28$$

dengan,

d_t = diameter tulangan yang digunakan

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

2.4 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

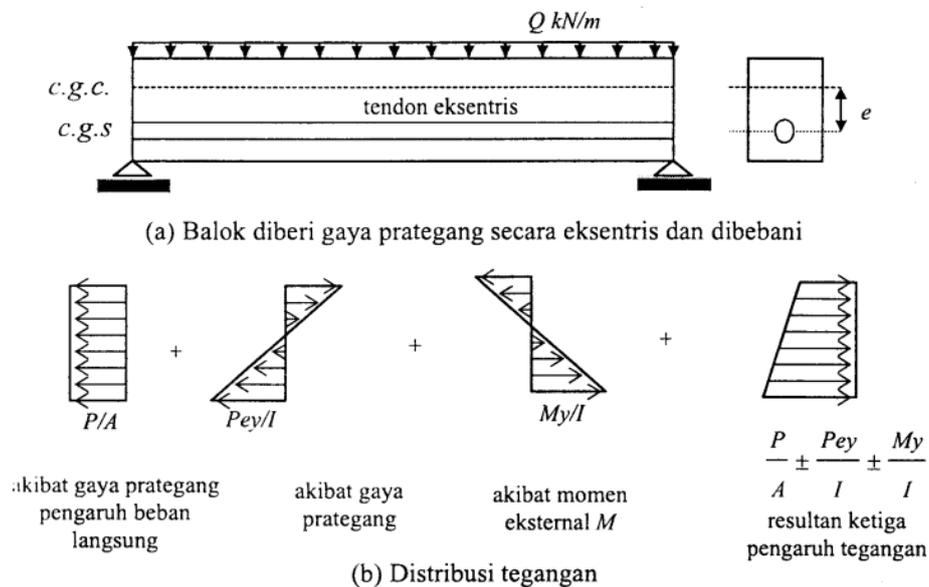
tegangan dalam dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban luar.

2.4.1 Konsep Dasar Beton Prategang

Menurut Lin & Burns (1993), untuk menganalisis sifat-sifat dasar beton prategang terdapat tiga konsep yang dapat digunakan antara lain:

1. Sistem prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis

Konsep ini merupakan buah pemikiran dari Eugene Freyssinet yang memvisualisasikan beton prategang sebagai beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan atau desakan terlebih dahulu (pratekan) pada bahan tersebut.



Gambar 2.7 Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang Eksentris

Sumber : (Supriyadi & Muntohar, 2007)

Dalam kasus sederhana, ambil contoh sebuah balok persegi panjang diberikan gaya prategang oleh sebuah tendon melalui sumbu pada titik berat seperti pada gambar dan dibebani oleh gaya eksternal. Gaya tarik prategang F pada tendon akan menghasilkan gaya tekan F yang sama pada beton yang bekerja pada titik berat tendon. Pada keadaan ini gaya yang berada pada titik berat penampang beton. Akibat gaya prategang F , tegangan merata sebesar

$$f = \frac{F}{A}$$

akan timbul pada penampang seluas A . Jika “ M ” adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, maka tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah

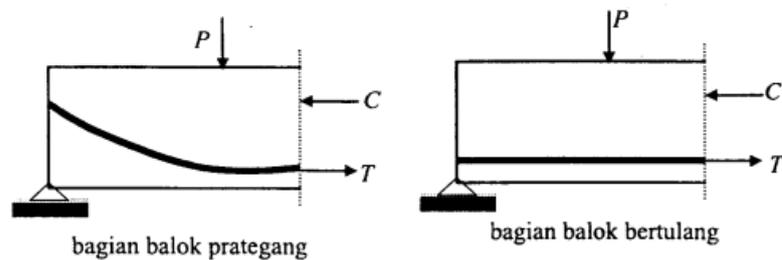
$$f = \frac{My}{I} \quad 2-30$$

dimana y adalah jarak dari sumbu yang melalui titik berat dan I adalah momen inersia penampang. Jadi distribusi tegangan yang dihasilkan adalah

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{My}{I} \quad 2-31$$

2. Sistem prategang untuk kombinasi beton dengan baja mutu tinggi

Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan desakan, dengan demikian kedua bahan membentuk tahanan yang menahan momen eksternal. Konsep ini mendasari metode perancangan kuat batas dan juga dapat dipakai pada keadaan elastis.

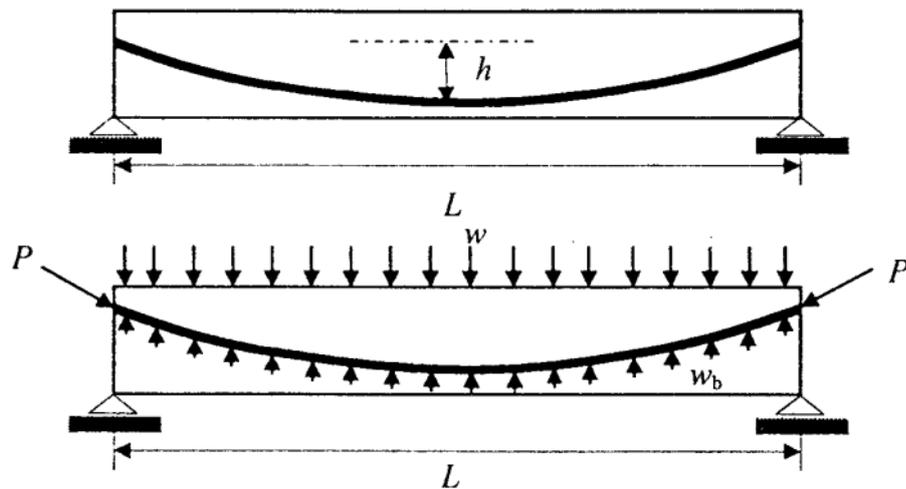


Gambar 2.8 Momen Tahanan Internal pada Balok Prategang dan Beton Bertulang

Sumber : (Supriyadi & Muntohar, 2007)

3. Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban

Konsep ini terutama menggunakan prategang sebagai usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah bentang. Penerapan dari konsep ini menganggap beton sebagai benda bebas dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya pada beton sepanjang bentang.



Gambar 2.9 Balok Prategang dengan Tendon Parabola

Sumber : (Supriyadi & Muntohar, 2007)

Beban yang terdistribusikan secara merata ke arah atas dinyatakan dalam:

$$w_b = \frac{8Fh}{L^2} \quad 2-32$$

dengan,

F = gaya prategang

L = Panjang bentang

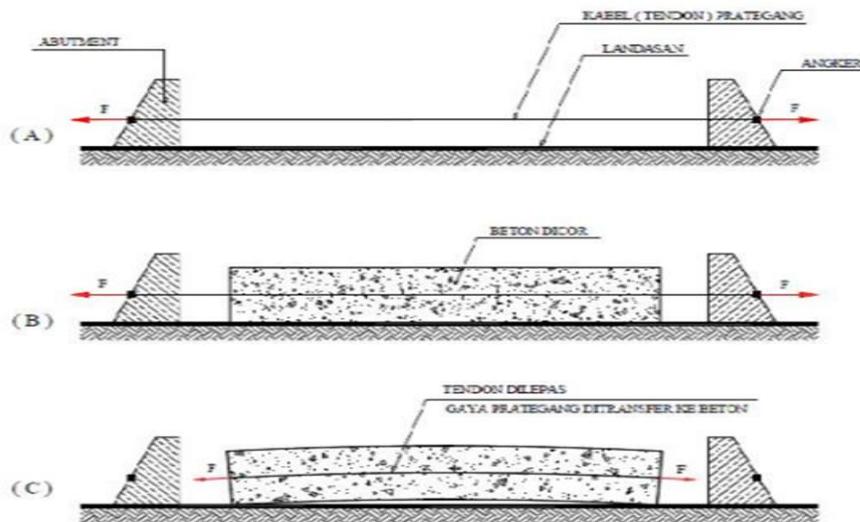
h = tinggi parabola.

2.4.2 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 2.10 Beton Prategang Pratarik

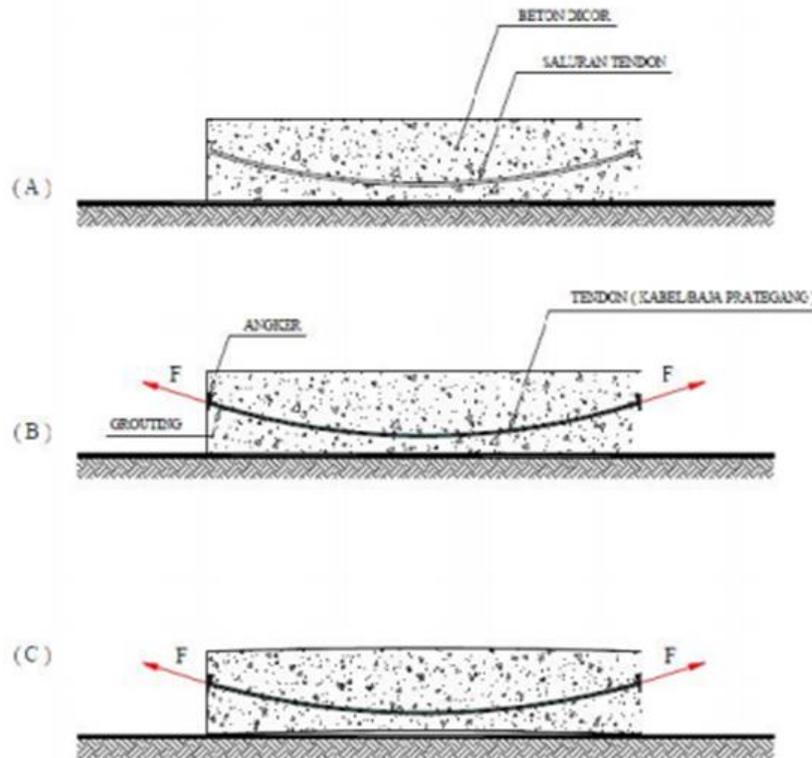
Sumber : (Supriyadi & Muntohar, 2007)

Tahapan metode:

- a. Kabel prategang (tendon) yang diberi gaya prategang pada sebuah landasan yang rata, kemudian dipasang angkur pada suatu abutment tetap.
- b. Beton dicor pada cetakan (*formwork*) dan landasan yang telah disediakan sedemikian sehingga melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dibiarkan mengering.
- c. 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 2.11 Beton Prategang Pascatarik

Sumber : (Supriyadi & Muntohar, 2007)

2.4.3 Material Beton Prategang

2.4.3.1 Beton

Beton adalah campuran semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran (*admixture*) (SNI 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 dan 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.

2.4.3.2 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 2847:2013).

Baja mutu tinggi untuk system prategang merupakan salah satu dari ketiga bentuk kawat (*wire*), untai kawat (*strand*), batang (*bar*). Penggunaan system pascatarik biasanya dipakai kawat yang digabungkan secara parallel menjadi kabel (T.Y Lin & H. Burns, 1993).

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

Tabel 2.4 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)

2.4.3.3 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 2847:2013).

2.4.3.4 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 2847:2013).

2.5 Perhitungan Gaya Prategang

2.5.1 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 :

$$\text{Tegangan di serat atas, } 0,5 \times \sqrt{f_{ci}} = \frac{-P_t}{A} + P_t \times e_s / W_a - M_{bs} / W_a \quad 2-33$$

$$\text{Tegangan di serat bawah, } -0,60 \times \sqrt{f_{ci}'} = -P_t / A - P_t \times e_s / W_b + M_{bs} / W_b \quad 2-34$$

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 :

$$\text{Tegangan di serat atas, } -0,45 \sqrt{f_{c'}} = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} - \frac{M_{TD}}{W_a} \quad 2-35$$

$$\text{Tegangan di serat bawah, } 0,50 \times \sqrt{f_{c'}} = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b} + \frac{M_{TD}}{W_b} \quad 2-36$$

2.5.2 Penentuan Letak, Batas Aman, dan Jumlah Tendon

Digunakan kabel yang terdiri dari beberapa kawat baja untaian (*strands cable*) standar VSL.

Jumlah strand minimal yang diperlukan,

$$n_s = \frac{P_t}{0,8 \times P_{bs}} \quad 2-37$$

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

$$p_o = \frac{P_t}{(n_t \times p_{b1})} \quad 2-38$$

dimana:

p_{b1} = beban satu strand

P_{bs} = beban putus minimal satu strands

Gaya prategang yang terjadi akibat jacking,

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs1} \quad 2-39$$

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:

$$a_2 = \frac{M_c}{T_1} \quad 2-40$$

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,

$$Y = -\frac{4 f_1 x (L-x)}{L^2} \quad 2-41$$

dimana:

f_1 = eksentrisitas bawah tendon

L = panjang jembatan

2.5.3 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 tentang 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 ankur

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

$$P_o = 97\% \times P_j \quad 2-42$$

2) Gesekan Kabel

Kehilangan gaya akibat gesekan kabel,

$$P_x = P_o \times e^{-\mu^*(\alpha + \beta * Lx)} \quad 2-43$$

Keterangan :

e = bilangan natural

μ = koefisien gesek

β = bilangan wobble

L_x = panjang bentang

Tabel 2.5 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 2.6 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),

$$\sigma_{pi} = \frac{ns \times Pbs}{A_t} \quad 2-44$$

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,

$$\Delta\sigma_{pe}' = \frac{\sigma_{pi} \times n \times Ke}{1 + n \times Ke} \quad 2-45$$

Keterangan :

n = Modulus rasio antara baja prategang dan *girder*

$$K_e = \frac{A_t}{A \times \left(\frac{e^2}{i^2}\right)} \quad 2-46$$

Tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prategang,

$$\Sigma b_t = \frac{\Delta\sigma_{pe}'}{n} - \frac{M_{balok} \times e_s}{I_x} \quad 2-47$$

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,

$$\Delta\sigma_{pe} = \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{bt} \quad 2-48$$

Loss of prestress akibat pemendekan elastis:

$$\Delta P_e = \Delta \sigma_{pe} \times A_t \quad 2-49$$

4) Pengankuran

Loss of prestress akibat ankur,

$$\Delta P = 2 \times L_{\max} \times \tan \omega \quad 2-50$$

$$P'_{\max} = P_o - \frac{\Delta P}{2} \quad 2-51$$

$$P_{\max} = P'_{\max} - \Delta P_e \quad 2-52$$

5) Pengaruh susut

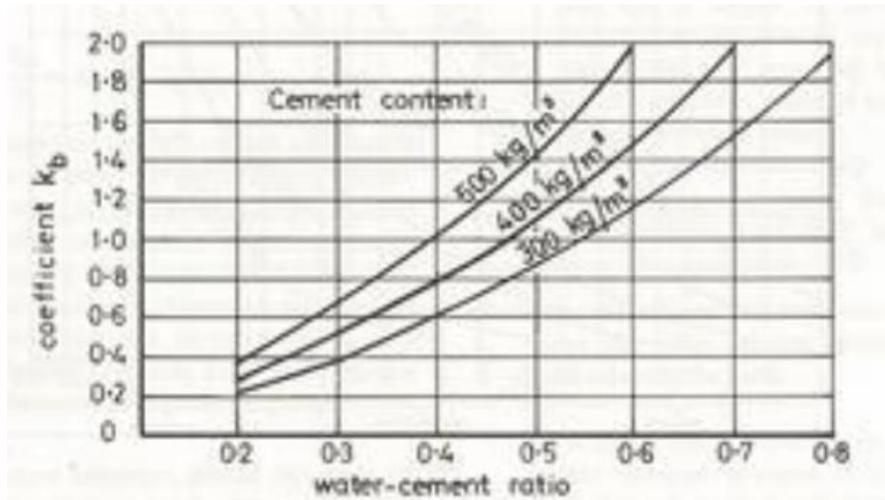
Berdasarkan Tabel 6.4 pada *NAASRA Bridge Design Specification*, regangan dasar susut (*basic shrinkage strain*) ditentukan sebagai berikut:

Tabel 2.7 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*)

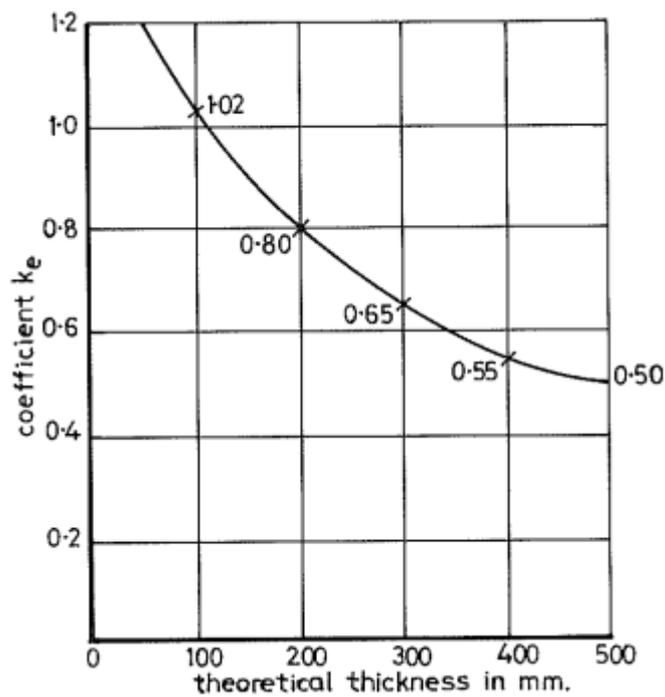
Koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen (*water cement ratio*) untuk beton mutu tinggi (k_b) dengan faktor air semen $W = 0,40$, dan *Cement concrete* = $4,5 \text{ kN/m}^3$, ditentukan sebagai berikut:



Gambar 2.12 Nilai Koefisien K_b

Sumber (NAASRA Bridge Design Specification, figure 6.1)

Koefisien yang tergantung pada tebal teoritis (e_m):



Gambar 2.13 Nilai Koefisien K_e

Sumber (NAASRA Bridge Design Specification, figure 6.2)

$$e_m = 2 \times \frac{A}{K} \tag{2-53}$$

Koefisien yang tergantung pada luas tulangan baja memanjang non prategang:

$$k_p = \frac{100}{100+20 p} \tag{2-54}$$

Dimana:

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

$$\Delta\varepsilon_{su} = \varepsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \quad 2-55$$

Tegangan susut,

$$\sigma_{sh} = \Delta\varepsilon_{su} \times E_s \quad 2-56$$

Keterangan :

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

E_s = modulus elastis baja prategang

6) Pengaruh rayapan

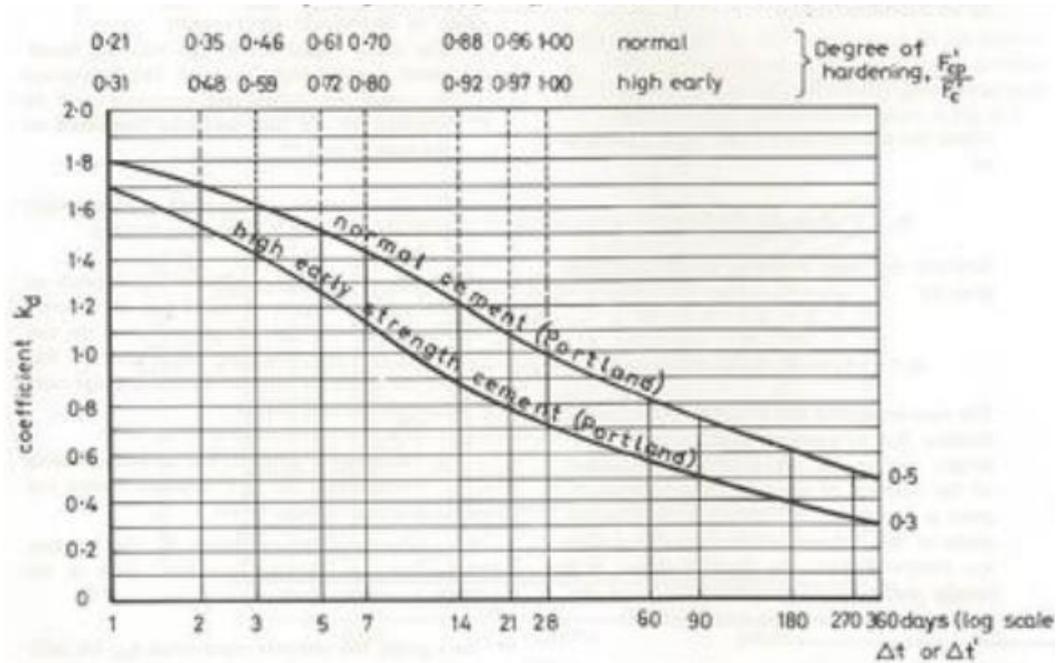
Koefisien yang tergantung pada kelembaban udara, ditetapkan sebagai berikut:

Tabel 2.8 Nilai Koefisien k_c

<i>Climatic condition</i>	<i>Average relative humidity as a percentage *8</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 2.14 Nilai Koefisien K_d

Sumber (NAASRA Bridge Design Specification, figure 6.4)

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

$$\varepsilon_{cr} = (f_c / E_{balok}) \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_{tn} \quad 2-57$$

keterangan :

 f_c = tegangan balok

Tegangan akibat creep,

$$\sigma_{cr} = \varepsilon_{cr} \times E_s \quad 2-58$$

Keterangan:

 ε_{cr} = regangan akibat creep E_s = modulus elastis baja prategang

Kehilangan gaya prategang akibat susut dan rangkai,

$$\Delta\sigma_{sc} = \sigma_{cr} + \sigma_{sh} \quad 2-59$$

$$\text{Kehilangan gaya prategang total} = \left(1 - \frac{P_{eff}}{P_j}\right) \times 100 \% \quad 2-60$$

2.5.4 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:

- Tegangan serat tekan terluar harus $\leq 0,60 f_{ci}'$;
- Tegangan serat tarik $\leq 0,50 \sqrt{f_{ci}'}$ apabila serat terluar mengalami tegangan tarik; dan
- 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:

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

1) Tegangan saat transfer

$$\text{Tegangan beton di serat atas, } f_a = -\frac{Pt}{A} + \frac{Pt \times es}{Wa} - \frac{Mbs}{Wa} \quad 2-61$$

$$\text{Tegangan beton di serat bawah, } f_b = -\frac{Pt}{A} - \frac{Pt \times es}{Wb} + \frac{Mbs}{Wb} \quad 2-62$$

2) Tegangan saat *loss of prestress*

$$f_a = -\frac{Peff}{A} + \frac{Peff \times es}{Wa} - \frac{Mbs}{Wa} \quad 2-63$$

$$f_b = -\frac{Peff}{A} - \frac{Peff \times es}{Wb} + \frac{Mbs}{Wb} \quad 2-64$$

3) Tegangan setelah pembetonan (beton muda)

$$f_a = -\frac{Peff}{A} + \frac{Peff \times es}{Wa} - \frac{M_{balok+plat}}{Wa} \quad 2-65$$

$$f_b = -\frac{Peff}{A} + \frac{Peff \times es}{Wa} - \frac{M_{balok+plat}}{Wa} \quad 2-66$$

4) Tegangan setelah plat dan balok menjadi komposit

$$\text{Tegangan di serat atas plat, } f_{ac} = -\frac{Peff}{A} + \frac{Peff \times es}{Wa} - \frac{M_{balok+plat}}{Wac} \quad 2-67$$

$$\text{Tegangan di serat atas balok, } f'_{ac} = -\frac{Peff}{A} + \frac{Peff \times es}{Wa} - \frac{M_{balok+plat}}{W'c} \quad 2-68$$

$$\text{Tegangan di serat bawah balok, } f_{bc} = -\frac{Peff}{A} - \frac{Peff \times es}{Wb} + \frac{M_{balok+plat}}{Wbc} \quad 2-69$$

5) Tegangan akibat beban

- Akibat beban sendiri

$$f_a = - M_{MS} / W_a \quad 2-70$$

$$f_b = M_{MS} / W_b \quad 2-71$$

- Akibat beban mati tambahan

$$f_a = - M_{MA} / W_a \quad 2-72$$

$$f_b = M_{MA} / W_b \quad 2-73$$

- Akibat susut dan rangkak

Gaya internal yang timbul akibat susut (NAASRA Bridge Design Specification, 1976) dinyatakan dengan persamaan:

$$P_s = A_{plat} \times E_{plat} \times \Delta \varepsilon_{su} \times n \times [(1 - e^{-c_f}) / c_f] \quad 2-74$$

$$c_f = k_d \times k_d \times k_d \times k_d \times (1 + k_{tn}) \quad 2-75$$

Tegangan akibat susut yang terjadi:

$$f_{ac} = \frac{P_s}{A_c} - \frac{P_s \times e'}{W_{ac}} \quad 2-76$$

$$f'_{ac} = \frac{P_s}{A_c} - \frac{P_s \times e'}{W'_{ac}} \quad 2-77$$

$$f_{bc} = \frac{P_s}{A_c} + \frac{P_s \times e'}{W_{bc}} \quad 2-78$$

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

$$\sigma_{cr} = (1 - e^{-c_f}) \times (\sigma_2 - \sigma_1) \quad 2-79$$

Tegangan pada balok sebelum *loss of prestress*:

$$f_{ac} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad 2-80$$

$$f'_{ac} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W'_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad 2-81$$

$$f_{bc} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e'}{W_{bc}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{bc}} \quad 2-82$$

Tegangan pada balok setelah *loss of prestress*:

$$f_{ac} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad 2-83$$

$$f'_{ac} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W'_{ac}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{ac}} \quad 2-84$$

$$f_{bc} = \frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_{bc}} - \frac{M_{balok+plat}}{W_{bc}} \quad 2-85$$

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

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_a} - \frac{M_{MS+MMA}}{W_a} \quad 2-86$$

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e'}{W_b} + \frac{M_{MS+MMA}}{W_b} \quad 2-87$$

Tegangan akibat susut dan rangkai dinyatakan sebagai berikut:

$$f = f_{susut} + f_{rangkai} \quad 2-88$$

- Akibat prategang

$$f_a = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} \quad 2-89$$

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e'}{W_b} \quad 2-90$$

- Akibat lajur “D”

$$f_a = -M_{TD} / W_a \quad 2-91$$

$$f_b = M_{TD} / W_b \quad 2-92$$

- Akibat beban pejalan kaki

$$f_a = -M_{TP} / W_a \quad 2-93$$

$$f_b = M_{TP} / W_b \quad 2-94$$

- Akibat beban rem

$$f_a = -M_{TB} / W_a \quad 2-95$$

$$f_b = M_{TB} / W_b \quad 2-96$$

- Akibat beban angin

$$f_a = -M_{EW} / W_a \quad 2-97$$

$$f_b = M_{EW} / W_b \quad 2-98$$

- Akibat beban gempa

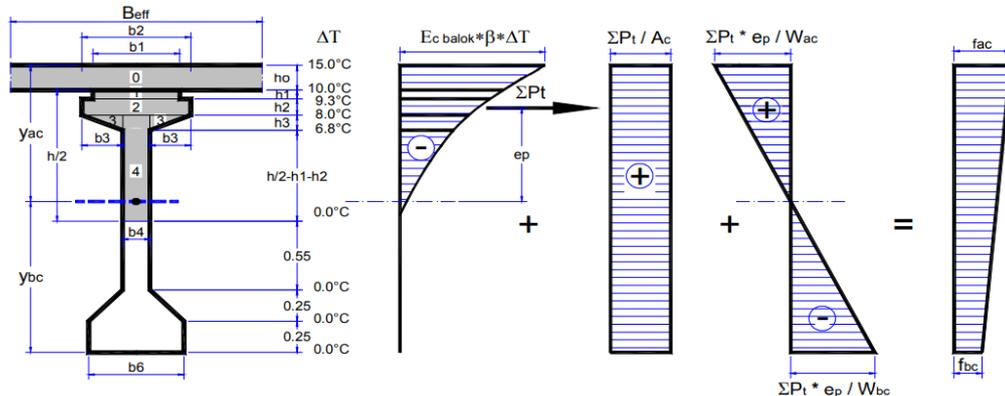
$$f_a = -M_{EQ} / W_a \quad 2-99$$

$$f_b = M_{EQ} / W_b \quad 2-100$$

- Tegangan yang terjadi akibat perbedaan temperatur

$$f_a = - E_c \times \beta \times \Delta T + \frac{\Sigma P t e}{A} + \frac{\Sigma P t e * e_p}{W a} \quad 2-101$$

$$f_b = \frac{\Sigma P t}{A} - \frac{\Sigma P t * e_p}{W b} \quad 2-102$$



Gambar 2.15 Diagram tegangan balok akibat perbedaan temperatur.

Sumber (RSNI T 12 2004)

Gaya internal akibat perbedaan temperatur:

$$P_{te} = A_{te} \times E_c \times \beta \times (T_a + T_b) / 2$$

Keterangan:

ΔT = Perbedaan temperatur (15°C)

e_p = Eksentrisitas pada balok akibat perbedaan temperatur

A_{te} = Luas tampang yang ditinjau

β = Koefisien muai (0,000011 /°C)

P_{te} = tegangan akibat temperatur

σ_1 = tegangan pada balok komposit pada kondisi awal sebelum kehilangan gaya prategang

σ_2 = tegangan pada balok komposit pada kondisi akhir setelah kehilangan gaya prategang

A = luas penampang balok

A_{plat} = luas penampang plat

c_f = residual creep factor

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

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

2.5.5 Lendutan

Kontrol lendutan dilakukan pada saat transfer dan pada saat layan. Pada saat transfer dimana beban berat sendiri yang bekerja terjadi lendutan ke atas yang disebabkan oleh tekanan tendon ke atas pada waktu penarikan kabel prategang. Lendutan yang terjadi diimbangi oleh beban layan sehingga menimbulkan lendutan pada balok. Lendutan yang terjadi tidak melebihi nilai lendutan maksimum. Menurut SK SNI lendutan maksimum yang diijinkan adalah $L/240$, dimana L adalah panjang bentang balok.

Lendutan terhadap beban merata,

$$\delta = \frac{5 \times Q \times L^4}{384 \times E_c \times I_x} \quad 2-103$$

Lendutan terhadap beban terpusat,

$$\delta = \frac{P \times L^3}{48 \times E_c \times I_x} \quad 2-104$$

Keterangan:

Q = beban merata

P = beban terpusat

E_c = modulus elastis beton

I_x = inersia

L = panjang bentang jembatan

2.5.6 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 $< 0,80 f_{py}$

$$\text{Momen nominal, } M_n = A_{ps} \times f_{ps} \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad 2-105$$

Keterangan:

A_{ps} = luas penampang tendon baja prategang

f_{ps} = kuat leleh baja prategang

d = tinggi

a = luas

2.5.7 Pembesian *End Block*

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

$$r_a = \frac{a_1}{a} \quad \text{dan} \quad r_b = \frac{b_1}{b} \quad 2-106$$

Bursting force untuk sengkang arah vertikal dan horisontal,

$$P_{bta} = 0,30 \times (1 - r_a) \times P_j \quad \text{dan} \quad P_{btb} = 0,30 \times (1 - r_b) \times P_j \quad 2-107$$

Luas tulangan sengkang arah vertikal dan horisontal yang diperlukan,

$$A_{ra} = \frac{P_{bta}}{0,85 \times f_s} \quad \text{dan} \quad A_{rb} = \frac{P_{btb}}{0,85 \times f_s} \quad 2-108$$

Tegangan ijin baja sengkang,

$$f_s = 0,578 \times f_y \quad 2-109$$

Luas penampang sengkang,

$$A_s = 2 \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad 2-110$$

Jumlah sengkang arah vertikal dan horisontal yang diperlukan,

$$n = \frac{A_{ra}}{A_s} \quad \text{dan} \quad n = \frac{A_{rb}}{A_s} \quad 2-111$$

2.5.8 Tinjauan Terhadap Geser

$$\text{Sudut kemiringan tendon, } a = \arctan x \frac{4 \times f_x (L-2X)}{L^2} \quad 2-112$$

$$\text{Komponen gaya arah x, } P_x = P_{eff} \times \cos a \quad 2-113$$

Komponen gaya arah y, $P_y = p_{eff} x \sin a$	2-114
Resultan gaya geser, $V_r = V - P_y$	2-115
Tegangan geser yang terjadi, $f_v = \frac{Vr \times Sx}{b \times I_x}$	2-116
Tegangan beton di serat atas, $f_a = -\frac{Px}{A} + \frac{Px \times e}{Wa} - \frac{M}{Wa}$	2-117
Sudut bidang geser, $\gamma = \frac{1}{2} \times \text{arc tan} \frac{2f_v}{f_a}$	2-118
Jarak sengkang yang diperlukan, $a_s = f_a \times \frac{at}{f_v \times b \times \tan y}$	2-119
Tegangan beton di serat bawah, $f_b = -\frac{Px}{A} + \frac{Px \times e}{Wb} - \frac{M}{Wb}$	2-120
Sudut bidang geser, $\gamma = \frac{1}{2} \times \text{arc tan} \frac{2f_v}{f_b}$	2-121
Jarak sengkang yang diperlukan, $a_s = f_b \times \frac{at}{f_v \times b \times \tan y}$	2-122