

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Bab ini berisikan teori-teori yang mendukung penulisan tugas akhir meliputi beberapa teori tentang perencanaan struktur jembatan dengan menggunakan beton prategang yang diperoleh dari buku, jurnal dan laporan tugas akhir dari peneliti sebelumnya.

3.2 Pengertian Jembatan

Menurut Supriyadi dan Muntohar (2000), jembatan adalah suatu bangunan yang memungkinkan suatu jalan menyilang sungai/saluran air, lembah atau menyilang jalan lain yang tidak sama tinggi permukaannya. Dalam perencanaan dan perancangan jembatan sebaiknya mempertimbangkan fungsi kebutuhan transportasi, persyaratan teknis dan estetika-arsitektural yang meliputi : aspek lalu lintas, aspek teknis, aspek estetika. Jembatan mempunyai arti penting bagi setiap orang. Akan tetapi tingkat kepentingannya tidak sama bagi setiap orang, sebab penglihatan/pandangan masing-masing orang yang melihat berbeda pula. Seseorang yang melintasi jembatan setiap hari pada saat pergi bekerja hanya dapat melintasi sungai bila ada jembatan, dan ia menyatakan bahwa jembatan adalah sebuah jalan yang diberi sandaran pada kedua tepinya. Tentunya bagi seorang pemimpin pemerintah dan dunia bisnis akan memandang hal yang berbeda pula.

Menurut Supriyadi dan Muntohar (2000) jembatan menurut bentuk dan tipenya dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu:

1. jembatan lengkung – batu (*stone arch bridge*),
2. jembatan rangka (*truss bridge*),
3. jembatan gantung (*suspension bridge*),
4. jembatan beton (*concrete brige*), dan
5. jembatan hauans/*cable stayed*.

Secara umum komponen struktur jembatan dibagi menjadi 2 bagian yaitu struktur atas dan struktur bawah. Setiap komponen struktur mempunyai fungsi masing-masing seperti yang terdapat dalam penjelasan berikut ini.

1. Struktur Atas (*Upper Structure*)

Struktur atas jembatan (*upper structure*) adalah komponen komponen jembatan yang dirancang untuk meneruskan baban yang diterima olah lantai jembatan hingga ke perletakan, dimana lantai jembatan adalah bagian jembatan yang langsung menerima baban lalu lintas dan pejalan kaki.

Struktur atas jembatan (*upper structure*) terdiri atas :

- a. dinding sandaran,
- b. konstruksi trotoar,
- c. lantai jembatan,
- d. gelagar (*girder*),
- e. balok diafragma, dan
- f. tumpuan (*bearing*).

2. Struktur Bawah (*Sub Structure*)

Struktur bawah (*sub structure*) merupakan komponen yang mendukung beban yang terjadi pada struktur atas (*upper structure*). Bagian-bagian yang merupakan struktur bawah jembatan antara lain adalah :

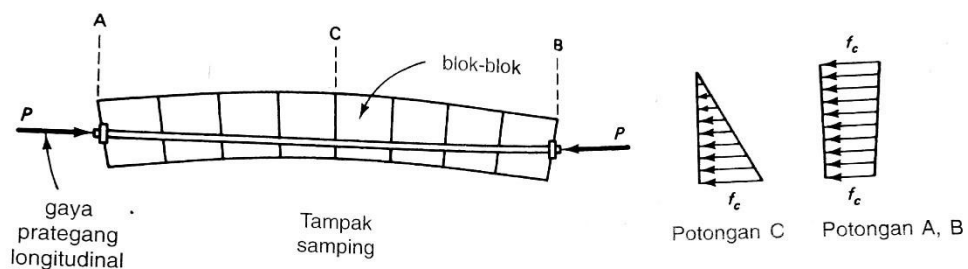
- a. *abutment*,
- b. pilar, dan
- c. pondasi.

3.3 Beton Prategang

Menurut Nawy (2001), beton adalah material yang kuat dalam kondisi tekan, tetapi lemah terhadap tarik: kuat tariknya bervariasi dari 8 sampai 14 persen dari kuat tekannya. Karena rendahnya kapasitas tarik tersebut, maka letak lentur terjadi pada taraf pembebanan yang masih rendah. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya prategang diberikan dalam arah longitudinal elemen struktural. Gaya ini mencegah berkembangnya retak dengan cara mengeliminasi atau sangat mengurangi tegangan tarik di bagian tumpuan dan

daerah kritis pada kondisi beban kerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur geser dan torsional penampang tersebut. Penampang dapat berperilaku elastis, dan hampir semua kapasitas beton dalam memikul tekan dapat secara efektif dimanfaatkan di seluruh tinggi penampang beton pada saat semua beban bekerja di struktur tersebut.

Gambar beton prategang dan tegangan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Beton Prategang dan Tegangan pada Beton

(Sumber : Nawy, 2001)

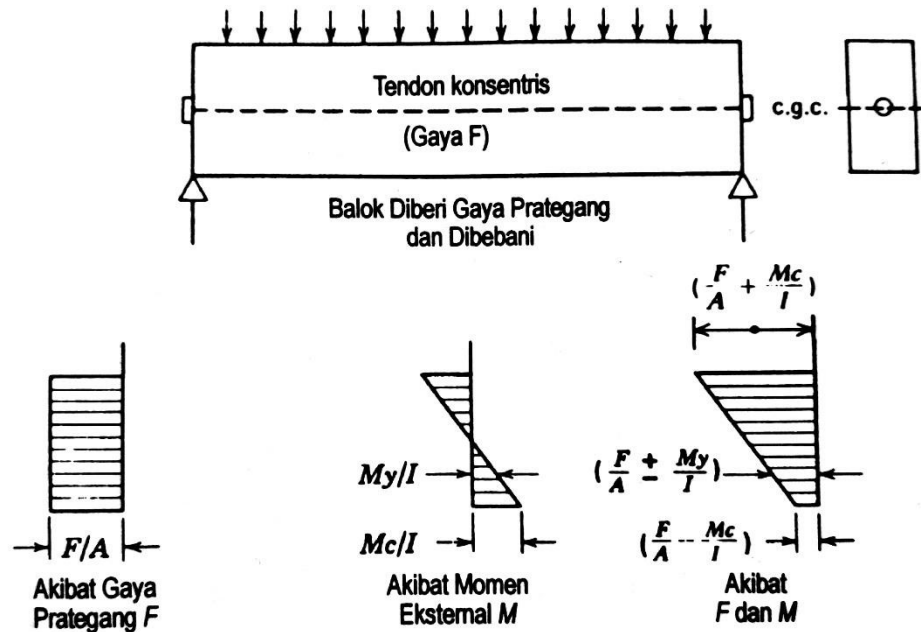
3.3.1 Prinsip-Prinsip Dasar Beton Prategang

Menurut Lin dan Burns (2000a), ada tiga konsep yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Penting bagi seorang perancang untuk mengerti ketiga konsep tersebut supaya dapat mendesain beton prategang dengan sebaik dan seefisien mungkin. Ketiga konsep tersebut adalah sebagai berikut.

1. Sistem Prategang untuk Mengubah Beton Menjadi Bahan yang Elastis

Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis dan mungkin merupakan pendapat yang umum dari para insinyur. Ini merupakan buah pemikiran Eugene Freyssinet yang memvisualisasikan beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan (desakan) terlebih dahulu (pratekan) pada bahan tersebut. Beton yang tidak mampu menahan tarikan dan kuat memikul tekanan (umumnya dengan baja mutu tinggi yang ditarik) sedemikian rupa sehingga beton yang getas dapat memikul tegangan tarik. Dari konsep ini lahirlah kriteria “tidak ada tegangan tarik” pada beton, berarti tidak

akan terjadi retak, dan beton tidak merupakan bahan yang getas lagi melainkan berubah menjadi bahan yang elastis. Gambar distribusi tegangan dan penampang beton prategang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



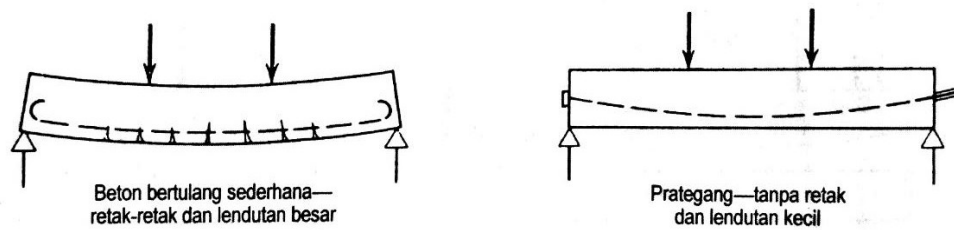
Gambar 3. 2 Distribusi Tegangan pada Penampang Beton Prategang

(Sumber : Lin dan Burns, 2000a)

2. Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi

Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi (gabungan) dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan tekanan, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal.

Pada beton prategang, baja mutu tinggi dipakai dengan jalan menariknya sebelum kekuatannya dimanfaatkan sepenuhnya. Jika baja mutu tinggi ditanamkan pada beton, seperti pada beton bertulang biasa, beton sekitarnya akan menjadi retak berat sebelum seluruh kekuatan baja digunakan. Oleh karena itu, baja perlu ditarik sebelumnya (pratarik) terhadap beton. Gambar perbandingan balok bertulang dengan balok prategang dengan baja mutu tinggi dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Balok Beton Menggunakan Baja Mutu Tinggi

(Sumber : Lin dan Burns, 2000a)

3. Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban

Konsep ini terutama menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang. Pada keseluruhan desain struktur beton prategang, pengaruh dari prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri sehingga batang yang mengalami lenturan seperti pelat (*slab*), balok, dan gelagar (*girder*) tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi. Ini memungkinkan transformasi dari batang lentur menjadi batang yang mengalami tegangan langsung dan sangat menyederhanakan persoalan baik di dalam desain maupun analisis dari struktur yang rumit.

3.3.2 Sistem Penarikan Baja Prategang

Ditinjau dari cara penarikan baja prategang, sistem beton prategang dibagi menjadi 2 macam yaitu pratarik dan pascatarik. Prinsip dan perbedaan dari masing-masing sistem penarikan baja prategang dapat dilihat pada penjelasan berikut ini.

1. Pratarik

Metode pratarik adalah metode sistem prategang dimana tendon-tendon di tarik sebelum beton dicor. Menurut Lin dan Burns (2000a) penarikan baja prategang dengan metode pratarik dilakukan dengan menarik kabel-kabel di antara dua dinding penahan (*bulkhead*) dan diangkurkan pada ujung-ujung pelataran kerja. Setelah beton mengeras, kabel-kabel dipotong dan lepas dari dinding penahan dan gaya prategang dialihkan ke beton.

2. Pascatarik

Menurut Supriyadi dan Muntohar (2000), metode pascatarik dilakukan dengan cara beton terlebih dahulu dicetak dengan membuat lubang (*ducting*) yang berfungsi sebagai alur untuk menempatkan *strand*. Saat beton sudah cukup kuat, *strands* ditarik dan dipasang angkur di kedua sisinya. Setelah itu lubang di *grouting*.

Dalam tugas akhir ini metode penarikan baja prategang yang digunakan adalah pascatarik dengan penarikan dilakukan pada dua sisi gelagar. Penarikan baja prategang dilakukan dengan cara menempatkan *hydraulic jack* di kedua sisi gelagar, kemudian baja prategang ditarik dari kedua sisi secara bersamaan sampai mencapai tegangan yang direncanakan. Setelah mencapai tegangan yang direncanakan, *strand* diberi angkur pada kedua ujung *strand* kemudian *hydraulic jack* dilepas dari *strand* sehingga gaya prategang diterima oleh beton.

3.3.3 Tahap Pembebanan

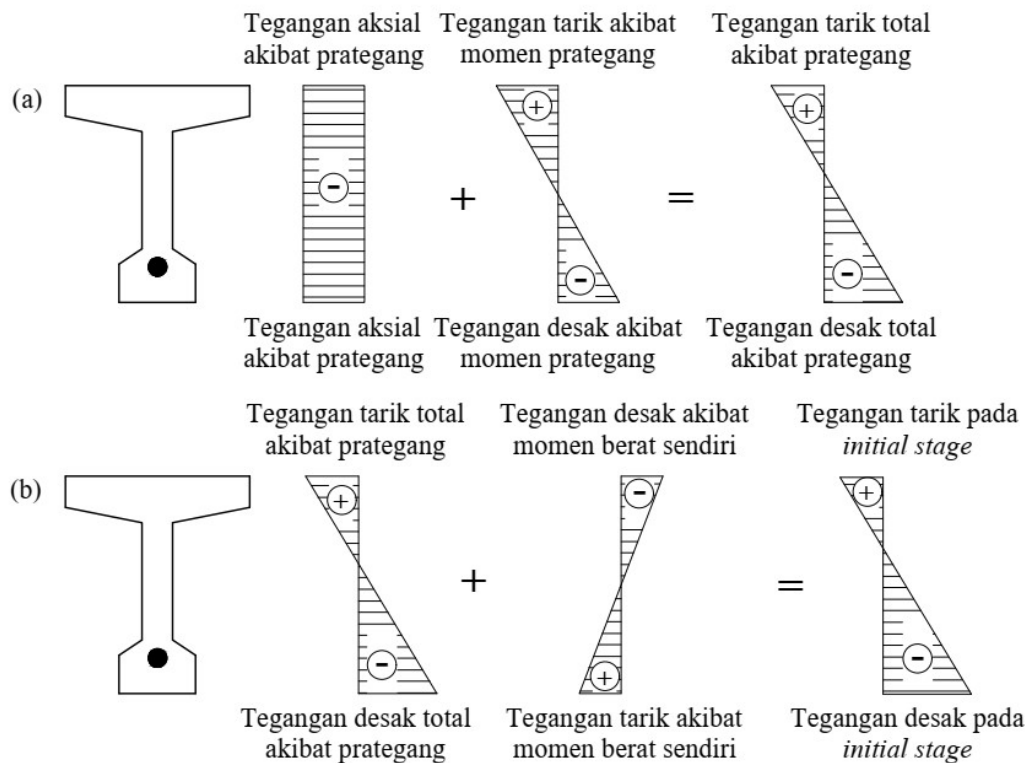
Supriyadi dan Muntohar (2000) menyatakan bahwa dalam perancangan beton prategang, pembebanan tidak hanya ditinjau berdasarkan beban eksternal yang bekerja seperti beban mati dan beban hidup, tetapi juga terhadap kombinasi dari beban-beban tersebut dengan gaya prategang yang bekerja pada penampang beton. Diantara tahap pembebanan tersebut yang paling kritis biasanya pada tahap sesaat setelah baja ditegangkan (*initial stage*) dan pada masa pelayanan/akhir (*service/final stage*).

1. *Initial Stage*

Initial stage adalah tahap dimana gaya prategang dipindahkan pada beton dan tidak ada beban luar yang bekerja selain berat sendiri. Pada tahap ini gaya prategang maksimum sebab belum ada kehilangan prategang dan kekuatan beton minimum sebab umur beton masih muda, konsekuensinya tegangan pada beton menjadi kritis. Pada sistem penarikan awal (*pre tensioning*), untuk mempercepat proses penarikan, tendon dilepaskan pada saat beton mencapai 60% - 80% kekuatan yang disyaratkan yaitu pada umur 28 hari. Pada sistem penarikan akhir (*post tensioning*), tendon tidak ditarik sekaligus tetapi ditarik

dalam dua atau tiga tahap untuk memberikan kesempatan kepada beton untuk mencapai kekuatan yang disyaratkan gaya prategang diterapkan sepenuhnya.

Tegangan yang terjadi pada *initial stage* dapat dilihat pada Gambar 3.4.

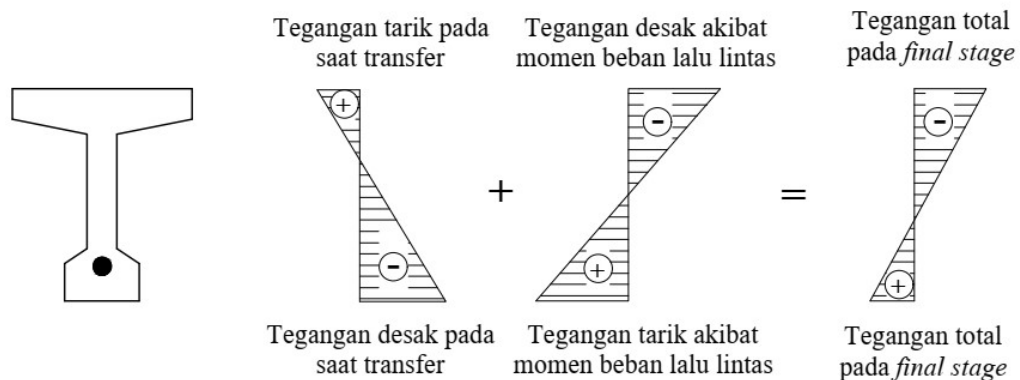


Gambar 3. 4 Diagram Tegangan yang Terjadi (a) akibat Prategang dan (b) pada *Initial Stage*

(Sumber : Nawy, 2001)

2. *Final Stage*

Tahap ini adalah pembebanan yang paling berat untuk kondisi masa pelayanan, dengan asumsi bahwa semua kehilangan prategang telah terjadi sehingga gaya prategang telah mencapai nilai terkecil dan kombinasi beban luar telah mencapai nilai terbesar yaitu meliputi berat sendiri, beban mati, beban hidup, beban kejut dan sejenisnya. Tegangan yang terjadi pada *final stage* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Diagram Tegangan yang Terjadi pada *Final Stage*

(Sumber : Nawy, 2001)

3.4 Pembebanan

Peraturan pembebanan yang digunakan dalam desain Jembatan Sambiroto adalah Peraturan Standar Pembebanan Untuk Jembatan SNI-1725-2016 dan Standar Perencanaan Gempa Untuk Jembatan SNI 2833-2008.

Beban rencana yang diperhitungkan dalam pengerjaan penelitian ini adalah:

1. beban tetap,
2. beban lalu lintas, dan
3. beban dari lingkungan.

3.4.1 Beban Tetap

Beban tetap pada jembatan meliputi berat sendiri, berat mati tambahan, susut dan rangkai, dan gaya prategang.

1. Berat Sendiri (*MS*)

Berat sendiri jembatan adalah berat bagian jembatan yang merupakan elemen struktural ditambah dengan elemen non struktural yang dianggap tetap.

Komponen jembatan yang merupakan berat sendiri adalah:

- a. gelagar jembatan, dan
- b. pelat lantai kendaraan.

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan pada jembatan terdiri dari beban non struktural yang membebani secara permanen dan dianggap satu kesatuan yang utuh dalam jembatan. Komponen jembatan yang merupakan beban mati tambahan adalah:

- a. *Overlay*;
- b. Sandaran, pagar pengaman dan penghalang beton;
- c. Sarana umum seperti pipa air, lampu jalan dan lain-lain; dan
- d. Genangan air hujan.

Komponen jembatan yang merupakan beban tetap dengan berat jenisnya dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Berat Satuan Material

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m^3)
1	Lapisan permukaan beraspal	22
2	Beton aspal	22
3	Beton $f'_c < 35$ MPa	22,0-25,0
	$35 < f'_c < 105$ MPa	$22 + 0,022f'_c$
4	Baja	78,5

(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

3. Pengaruh Rangkak dan Penyusutan

Pengaruh rangkak dan penyusutan dihitung dengan menggunakan beban mati dari jembatan. apabila rangkak dan penyusutan bisa mengurangi pengaruh muatan lainya maka harga dari rangkak dan penyusutan tersebut harus diambil minimum (misalnya pada waktu transfer dari beton prategang).

4. Pengaruh Prategang

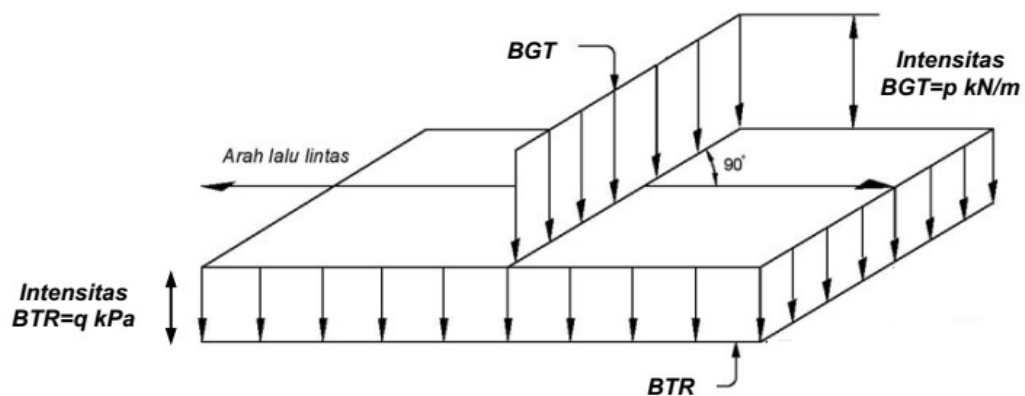
Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen-komponen yang terkekang pada bangunan statis tak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan maupun batas ultimit. Prategang harus diperhitungkan sebelum (selama pelaksanaan) dan sesudah kehilangan tegangan dalam kombinasinya dengan beban-beban lainnya.

3.4.2 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur “D” dan beban truk “T”. Beban lajur “D” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri.

1. Beban Lajur “D” (*TD*)

Beban lajur “D” terdiri dari beban tersebar merata (*BTR*) yang digabung dengan beban garis (*BGT*) sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Beban “D” : BTR vs Panjang yang Dibebani

(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

- a. Beban Terbagi Rata (*BTR*) mempunyai intensitas q kPa, dimana besarnya tergantung pada panjang total yang dibebani L ,

$$L \leq 30 \text{ m} : 9,0 \text{ kPa}$$

$$L > 30 \text{ m} : 9,0 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \quad (3. 1)$$

Dimana penjelasan dari notasi adalah sebagai berikut.

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

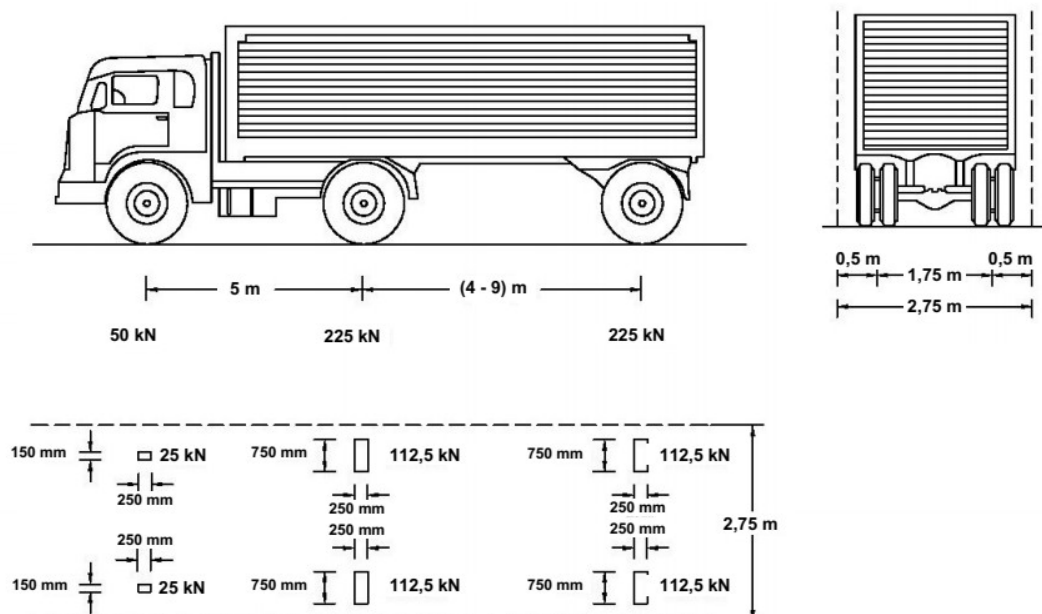
L adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter).

b. Beban garis (*BGT*)

Berdasarkan SNI-1725-2016 (2016), Beban Garis Terpusat (*BGT*) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas p adalah 49,0 kN/m.

2. Pembebanan Truk “T” (*TT*)

Pembebanan truk “T” terdiri dari kendaraan truk *semi trailer* yang mempunyai susunan seperti Gambar 3.7. Berat dari masing-masing as disebarkan menjadi 2 beban terpusat dimana jarak antar as dapat diubah ubah antara 4 m- 9 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 3. 7 Pembebanan Truk “T” (500 kN)

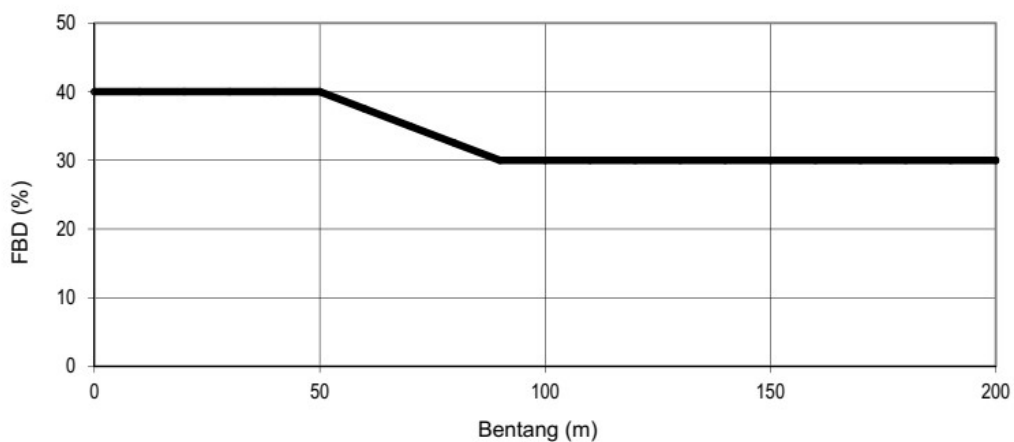
(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

Berdasarkan SNI-1725-2016 (2016), Beban Truk “T” tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai. Pada penelitian ini, pelat lantai pada struktur balok sederhana dan balok menerus disamakan dengan struktur jembatan eksisting, sehingga beban truk tidak diperhitungkan dalam analisis.

3. Faktor Beban Dinamis

Faktor beban dinamis (*FBD*) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan. Untuk perencanaan, *FBD* dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen. Pembebanan “D”: *FBD* merupakan fungsi dari panjang bentang ekuivalen seperti tercantum dalam Gambar 3.8.

Untuk pembebanan truk “T”: *FBD* diambil 30%. Harga *FBD* yang dihitung digunakan pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah.



Gambar 3. 8 Faktor Beban Dinamis untuk BGT untuk Pembebanan Lajur “D”

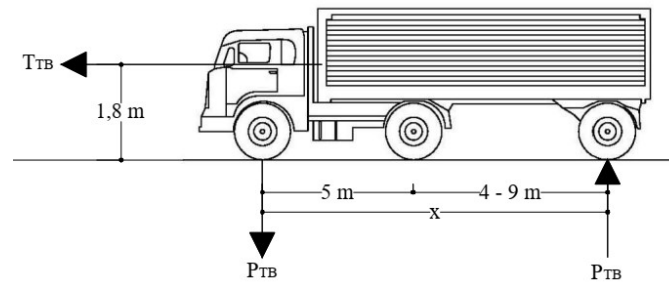
(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

4. Gaya Rem (*TB*)

Berdasarkan SNI-1725-2016, gaya rem harus dipilih 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 tersebut harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan. Gaya rem bekerja seperti yang digambarkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Transfer Gaya Rem pada Balok

3.4.3 Aksi dari Lingkungan

Aksi lingkungan meliputi pengaruh temperatur, angin, gempa, dan penyebab-penyebab alamiah lainnya.

1. Pengaruh Temperatur (EU_n)

Perhitungan pengaruh temperatur dalam desain Jembatan Sambiroto menggunakan Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI-1725-2016. Variasi temperatur jembatan rata-rata digunakan dalam menghitung pergerakan pada temperatur dan sambungan pelat lantai, dan untuk menghitung beban akibat terjadinya pengekangan dari pergerakan tersebut.

Temperatur jembatan rata-rata nominal dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan sifat bahan rata-rata akibat pengaruh temperatur dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 2 Temperatur Jembatan Rata-Rata Nominal

Tipe Bangunan Atas	Temperatur Jembatan Rata-Rata Minimum (1)	Temperatur Jembatan Rata-Rata Maksimum
Lantai beton di atas gelagar, atau boks beton.	15 °C	40 °C
Lantai beton di atas gelagar, boks atau rangka baja.	15 °C	40 °C
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks atau rangka baja	15 °C	45 °C
Catatan (1) Temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5°C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500m di atas permukaan laut.		

(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

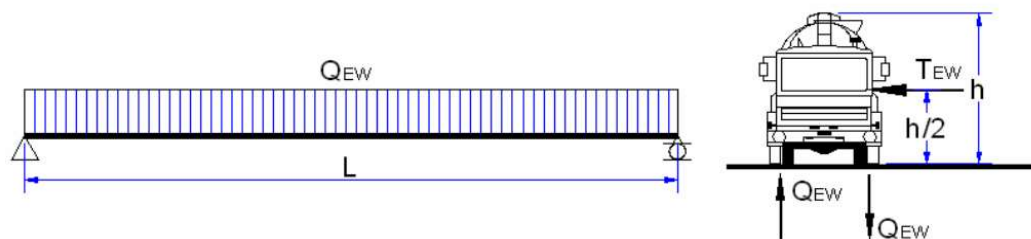
Tabel 3. 3 Sifat Bahan Rata-Rata Akibat Pengaruh Temperatur

Bahan	Koefisien Perpanjangan Akibat Suhu (α)	Modulus Elastisitas MPa
Baja	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	200.000
Beton		
Kuat tekan <30 MPa	$10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$4700\sqrt{f'_c}$
Kuat tekan >30 MPa	$11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$4700\sqrt{f'_c}$

(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

2. Gaya Angin pada Kendaraan (EW_L)

Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan. Gaya angin pada kendaraan bekerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.

**Gambar 3. 10 Beban Angin pada Gelagar**

(Sumber : Ilham, 2008, 15 Maret 2017)

3. Beban Gempa (EQ)

Beban rencana gempa minimum diperoleh dari persamaan berikut :

$$T_{EQ} = K_h \cdot W_T \quad (3.2)$$

dimana :

$$K_h = C \cdot S \quad (3.3)$$

Dengan pengertian sebagai berikut.

- T_{*EQ} = gaya geser total dalam arah yang ditinjau (kN)
- K_h = koefisien beban gempa horizontal
- C = koefisien geser dasar untuk daerah, waktu dan kondisi setempat yang sesuai. Koefisien geser dasar dapat dilihat pada Gambar 3.11 dan Gambar 3.12.
- I = faktor kepentingan
- S = faktor tipe bangunan
- W_T = berat total nominal bangunan, diambil sebagai beban mati ditambah beban mati tambahan (kN).

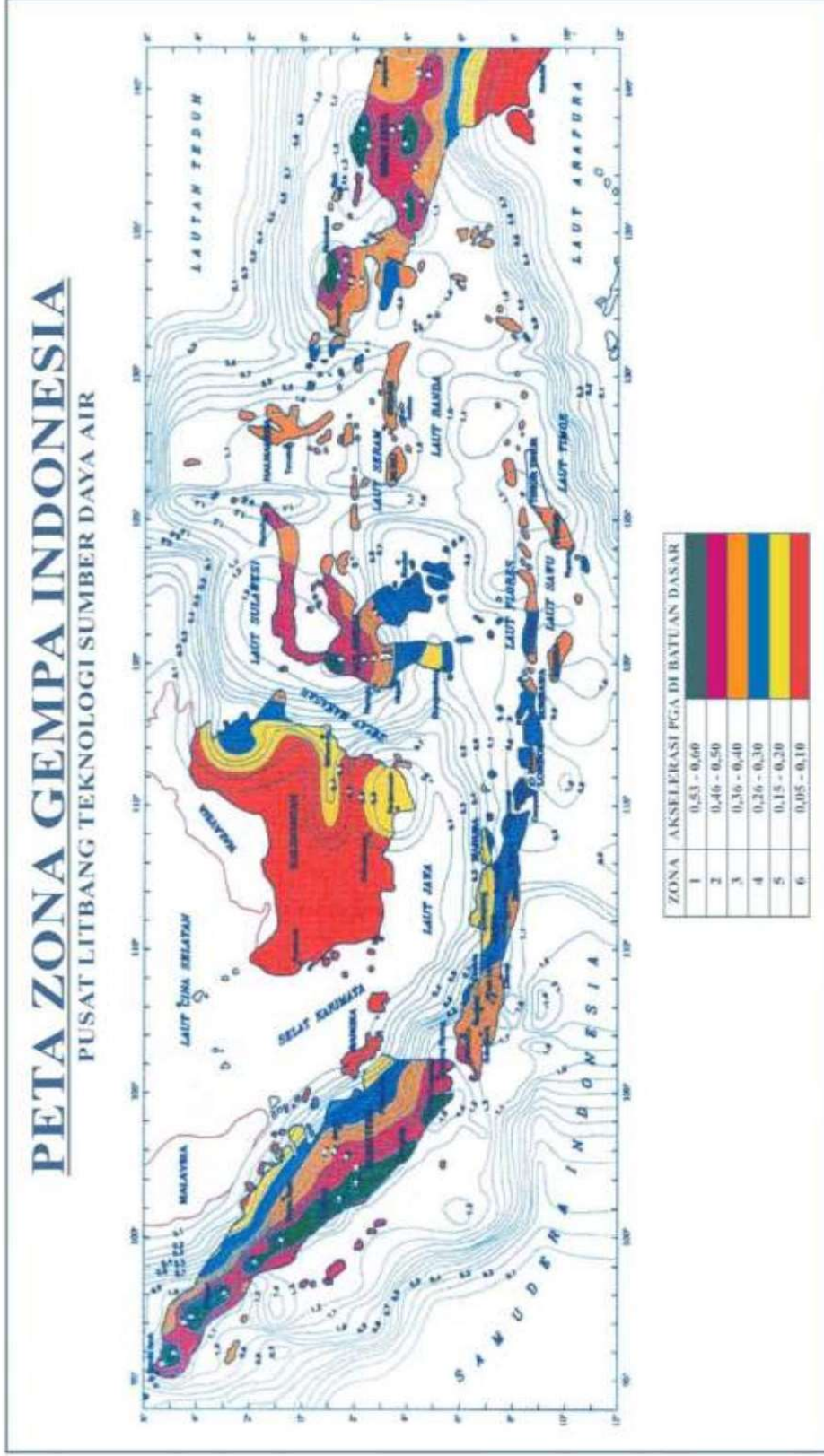
Waktu getar struktur yang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_{TP}}{g \cdot K_p}} \quad (3.4)$$

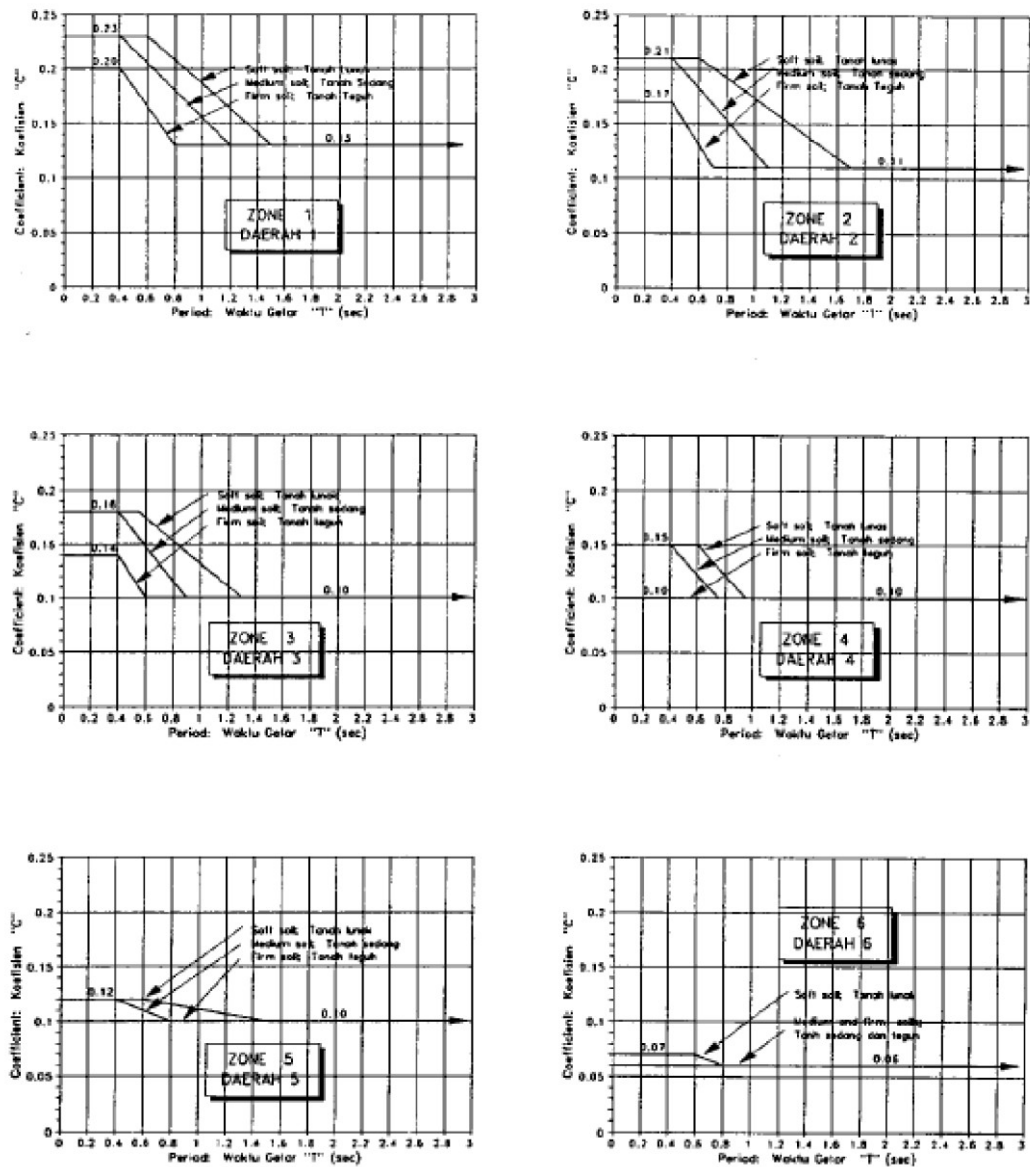
$$K_p = 48 \cdot E_c \cdot \frac{I_c}{L^3} \quad (3.5)$$

Dengan pengertian sebagai berikut.

- T = waktu getar struktur (detik)
- W_{TP} = berat total nominal bangunan atas termasuk beban mati tambahan ditambah setengah beban pilar (bila perlu dipertimbangkan) (kN)
- g = percepatan gravitasi (9,8 m/dt²)
- K_p = kekakuan struktur yang merupakan gaya horizontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan (kN/m)
- E_c = modulus elastis beton (kPa)
- I_c = momen inersia balok komposit (m⁴)
- h = tinggi struktur (m)



Gambar 3. 11 Wilayah Gempa Indonesia untuk Periode Ulang 500 Tahun
 (Sumber : SNI-2833-2008, 2008)



Gambar 3. 12 Koefisien Geser Dasar (C) Plastik Untuk Analisis Data
(Sumber : SNI-2833-2008, 2008)

3.4.4 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan berdasarkan SNI-1725-2016 dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	MS		MA	PR	SH	TD	TB	EW _L	EU _h	EQ
	Pracetak	Cor Ditempat								
Kuat I	1,2	1,3	2	1	0,5	1,8	1,8		1,2	
Kuat II	1,2	1,3	2	1	0,5	1,4	1,4		1,2	
Kuat III	1,2	1,3	2	1	0,5				1,2	
Kuat IV	1,2	1,3	2	1	0,5				1,2	
Kuat V	1,2	1,3	2	1	0,5			1	1,2	
Ekstrem I	1,2	1,3	2	1	0,5	0,3	0,3			1
Ekstrem II	1,2	1,3	2	1	0,5	0,5	0,5			
Layan I	1	1	1	1	1	1	1	1	1,2	
Layan I	1	1	1	1	1	1,3	1,3		1,2	
Layan I	1	1	1	1	1	0,8	0,8		1,2	
Layan I	1	1	1	1	1				1,2	
Fatik (TD dan TR)						0,75	0,75			

(Sumber: SNI-1725-2016, 2016)

Arti dari notasi yang digunakan dalam kombinasi pembebanan pada Tabel 3.4 dijabarkan sebagai berikut.

<i>MS</i>	= beban mati komponen struktural dan non struktural jembatan
<i>MA</i>	= beban mati perkerasan dan utilitas
<i>PR</i>	= prategang
<i>SH</i>	= gaya akibat susut/rangkak
<i>TD</i>	= beban lajur “D”
<i>TB</i>	= gaya akibat rem
<i>EW_L</i>	= beban angin pada kendaraan
<i>EU_n</i>	= gaya akibat temperatur seragam
<i>EQ</i>	= gaya gempa

3.5 Perencanaan Struktur Atas Jembatan

3.5.1 Beton, Baja Non Prategang, dan Baja Prategang

Berikut ini adalah teori dan persamaan yang digunakan dalam perhitungan yang meliputi material gelagar yaitu beton, baja tulangan, dan baja prategang.

1. Beton

Berikut ini adalah persamaan yang digunakan dalam perhitungan beton.

Kuat tekan beton

$$f'_c = 0,83 \times K \times 100 \quad (3.6)$$

Kuat tekan beton pada kondisi awal

$$f_{ci} = 0,8 \times f'_c \quad (3.7)$$

β_1 adalah sebesar 0,85 untuk $f'_c \leq 30$ MPa, sedangkan untuk $f'_c > 30$ MPa menggunakan persamaan 3.9.

$$\beta_1 = 0,85 ; \text{ jika } f'_c \leq 30 \text{ MPa} \quad (3.8)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05}{7} (f'_c - 30) ; \text{ jika } f'_c > 30 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

Modulus elastis beton

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3.10)$$

Modulus elastis beton prategang

$$E_c = 0.043 \cdot W_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3.11)$$

Tegangan ijin beton dibedakan menjadi tegangan ijin beton pada saat awal (saat transfer) dimana beton belum mencapai kekuatan maksimumnya dan kondisi akhir dimana beton sudah mencapai kekuatan maksimumnya.

a. Tegangan ijin beton saat transfer untuk struktur lentur berdasarkan RSNI-T-12-2004 adalah sebagai berikut.

- 1) Tegangan tekan pada serat terluar $f_{ci} \leq 0,6f'_c$.
- 2) Tegangan tarik pada serat terluar $f_{ti} \leq 0,25\sqrt{f'_c}$.

b. Tegangan ijin beton saat akhir untuk struktur lentur berdasarkan RSNI-T-12-2004 adalah sebagai berikut.

- 1) Tegangan tekan pada serat terluar $f_{cs} \leq 0,45f'_c$.
- 2) Tegangan tarik pada serat terluar $f_{ts} \leq 0,5\sqrt{f'_c}$.

Penjelasan notasi dari persamaan tegangan ijin adalah sebagai berikut.

f'_{ci} = kuat tekan beton pada saat transfer, dan

f_{ti} = kuat tarik beton pada saat transfer.

2. Baja Non Prategang

Kuat tarik leleh f_y ditentukan dari hasil pengujian, tetapi perencanaan tulangan tidak boleh didasarkan pada kuat leleh f_y yang melebihi 550 MPa.

$$f_y = U \cdot 10 \quad (3.12)$$

Modulus elastisitas baja non prategang dapat ditetapkan sebesar :

$E_s = 200.000$ MPa; atau ditentukan dari hasil pengujian.

3. Baja Prategang

Kuat tarik baja prategang f_{pu} dapat ditentukan dari hasil pengujian atau diambil sebesar mutu baja yang disebutkan oleh fabrikator. Berdasarkan RSNI-T-12-2004, tegangan ijin tendon prategang (f_{ps}) adalah sebagai berikut.

a. Tegangan ijin pada kondisi batas layan.

- 1) Tendon pascatarik pada daerah jangkar dan sambungan sesaat setelah penyaluran gaya $\leq 0,70f_{pu}$.
- 2) Untuk kondisi layan, $\leq 0,60f_{pu}$.

b. Tegangan ijin pada kondisi transfer gaya prategang.

- 1) Akibat gaya pengangkuran $\leq 0,94f_{py}$ tetapi tidak lebih besar dari $0,85f_{pu}$.
- 2) Sesaat setelah pemindahan gaya prategang $\leq 0,82f_{py}$ tetapi tidak lebih besar dari $0,74f_{pu}$.

Dengan pengertian notasi sebagai berikut.

f_{ps} = tegangan pada baja prategang di saat penampang mencapai kuat nominalnya,

f_{py} = kuat leleh baja prategang, dan

f_{pu} = kuat tarik baja prategang.

3.5.2 Perencanaan Penampang Balok/Gelagar Prategang

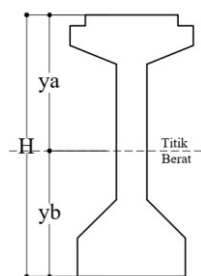
Perencanaan penampang balok prategang meliputi perhitungan luas penampang balok, titik berat, momen inersia dan modulus penampang balok. Persamaan yang digunakan dalam perencanaan penampang balok dapat dilihat pada Persamaan 3.13 sampai Persamaan 3.18.

Letak Titik berat

$$y_b = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} \quad (3.13)$$

$$y_a = H - y_b \quad (3.14)$$

Nomenklatur pada persamaan 3.13 dan 3.14 dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Nomenklatur Untuk Persamaan 3.13 dan 3.14

Momen inersia

$$I = \sum I_0 + \sum (A \cdot \Delta_y^2) \quad (3.15)$$

Kuadrat jari-jari girasi

$$r^2 = \frac{I}{A} \tag{3.16}$$

Modulus penampang

$$S_a = \frac{I}{y_a} \tag{3.17}$$

$$S_b = \frac{I}{y_b} \tag{3.18}$$

penjelasan dari notasi persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

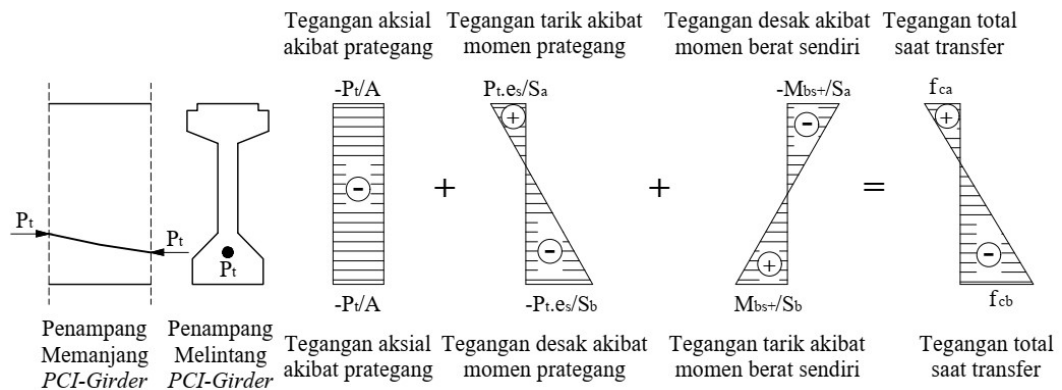
- y_b = letak titik berat ditinjau dari bawah balok,
- y_a = letak titik berat ditinjau dari atas balok,
- I = momen inersia,
- S_a = modulus penampang atas, dan
- S_b = modulus penampang bawah.

3.5.3 Tegangan yang Terjadi pada Gelagar Prategang

Tegangan yang terjadi pada balok prategang dihitung berdasarkan kondisi awal dan kondisi akhir.

1. Kondisi Awal (Saat Transfer)

Tegangan yang terjadi pada kondisi awal adalah kondisi pada saat penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah baban sendiri balok. Penampang yang dipakai pada kondisi awal adalah penampang bersih/*netto*. Gambar diagram tegangan beton pada saat transfer dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Diagram Tegangan Beton pada Saat Transfer

Persamaan yang dipakai untuk menghitung tegangan yang terjadi pada kondisi awal dapat dilihat pada persamaan berikut.

Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \times e_s}{S_a} - \frac{M_{balok}}{S_a} \tag{3.19}$$

Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \times e_s}{S_b} + \frac{M_{balok}}{S_b} \tag{3.20}$$

Eksentrisitas tendon

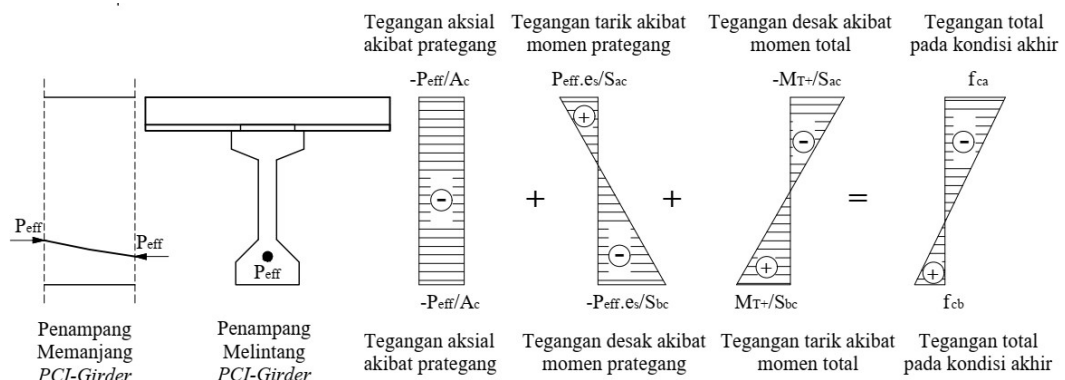
$$e_s = y_b - z_0 \tag{3.21}$$

2. Kondisi Akhir

Tegangan yang terjadi pada kondisi akhir adalah kondisi pada saat semua gaya sudah bekerja. Penampang yang dipakai dalam kondisi akhir adalah penampang dalam kondisi komposit dengan gaya prategang yang digunakan adalah gaya prategang efektif. Gaya prategang efektif adalah gaya prategang yang sudah dikurangi kehilangan gaya prategang seperti pada persamaan 3.22.

$$P_{eff} = (1 - LOP) P_j \tag{3.22}$$

Gambar diagram tegangan beton pada kondisi akhir dapat dilihat pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Diagram Tegangan Beton pada Kondisi Akhir

Persamaan yang dipakai untuk menghitung tegangan yang terjadi pada kondisi akhir dapat dilihat pada persamaan berikut.

Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \quad (3.23)$$

Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \quad (3.24)$$

Momen total,

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L \quad (3.25)$$

Dengan penjelasan notasi :

P_{eff} = gaya prategang efektif (gaya prategang setelah terjadi seluruh kehilangan prategang),

M_T = momen total,

M_D = momen akibat berat sendiri gelagar,

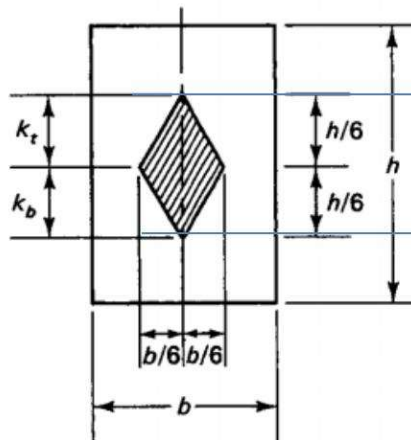
M_{SD} = momen akibat beban mati tambahan, dan

M_L = momen akibat beban hidup.

3.5.4 Tata Letak Tendon

Tendon pada balok prategang diletakkan sedekat mungkin dengan sisi atas atau bawah balok, sesuai dengan momen yang terjadi pada balok tersebut untuk mendapatkan momen gaya dalam maksimum. Jika terjadi momen positif, maka tendon diletakkan sedekat mungkin dengan sisi bawah balok, tetapi jika terjadi momen negatif, tendon diletakkan sedekat mungkin dengan sisi atas balok.

Tendon juga sebaiknya diletakkan pada area inti (*core zone/kern*). *Core zone* adalah area di sekitar titik berat penampang yang jika ada gaya prategang yang bekerja pada zona tersebut, maka tidak akan terjadi tegangan tarik pada beton prategang. Pada penampang persegi, batas *kern* atas dan *kern* bawah adalah selebar $h/6$ dari pusat berat persegi dimana h adalah tinggi balok seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.16. Pada tampang yang lebih rumit, batas *kern* dapat dihitung dengan persamaan berikut 3.26 dan 3.27.

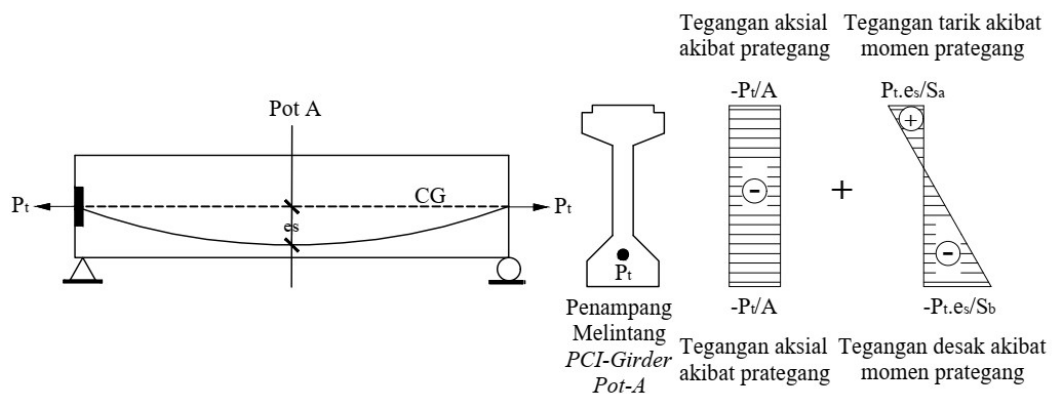


Gambar 3. 16 Batas Kern pada Penampang Persegi
(Sumber : Nawy, 2001)

Batas kern atas, $k_t = \frac{r^2}{y_b}$ (3. 26)

Batas kern bawah, $k_b = \frac{r^2}{y_a}$ (3. 27)

Eksentrisitas tendon dipengaruhi oleh besar momen yang terjadi pada setiap titik, sehingga eksentrisitas tendon didesain sesuai dengan momen yang terjadi. Eksentrisitas tendon selain dapat menyebabkan tegangan desak pada beton di sekitar tendon, juga menyebabkan tegangan tarik pada sisi lain penampang beton seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Tegangan Akibat Eksentrisitas Tendon

Perencanaan tata letak tendon didasarkan pada kondisi awal (saat transfer) untuk menentukan batas bawah dan kondisi akhir untuk menentukan batas atas yang dijelaskan pada poin-poin berikut.

1. Batas bawah

Batas bawah zona tendon dihitung berdasarkan momen yang bekerja pada saat transfer yaitu momen akibat beban mati.

$$a_{min} = \frac{M_D}{P_i} \quad (3.28)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_b = a_{min} + k_b \quad (3.29)$$

Letak tendon yang paling optimum adalah yang terletak pada daerah eksentrisitas maksimum. Daerah eksentrisitas maksimum adalah daerah eksentrisitas yang menghasilkan tegangan tarik yang masih di bawah tegangan tarik ijin. Untuk itu, zona tendon dapat diperlebar sehingga dapat menghasilkan tegangan tarik pada beton, tetapi tidak melebihi tegangan ijin yang disyaratkan. Eksentrisitas maksimum pada batas bawah dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$e_b = \frac{f_{ti} \cdot k_b \cdot A_n}{P_i} \quad (3.30)$$

2. Batas atas

Batas atas zona tendon dihitung berdasarkan kondisi akhir jembatan dimana semua gaya luar telah bekerja pada jembatan.

$$a_{max} = \frac{M_t}{P_e} \quad (3.31)$$

Batas eksentrisitas atas,

$$e_t = a_{max} - k_t \quad (3.32)$$

Eksentrisitas maksimum pada batas atas dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$e_t = \frac{f_t \cdot K_t \cdot A_c}{P_{eff}} \quad (3.33)$$

3.5.5 Kehilangan Gaya Prategang

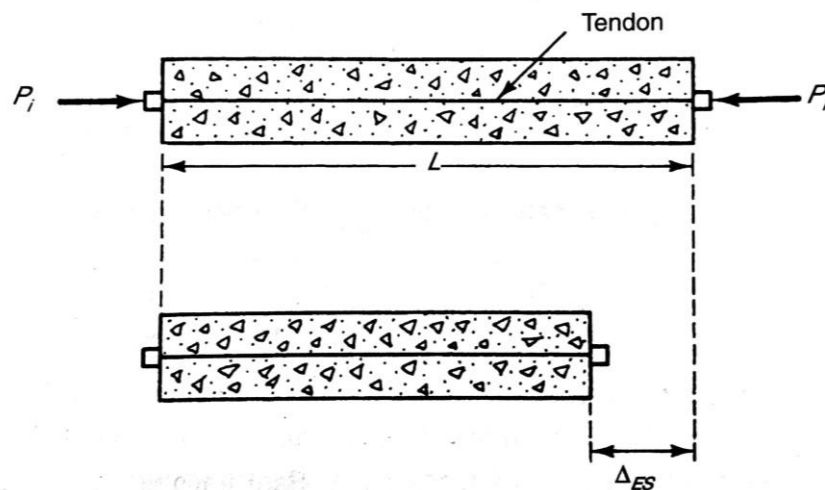
Kehilangan gaya prategang dibedakan menjadi 2, yaitu kehilangan gaya prategang jangka pendek dan kehilangan gaya prategang jangka panjang.

1. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Pendek

Kehilangan gaya prategang jangka pendek terjadi pada saat proses transfer gaya prategang, dan terjadi pada waktu singkat. Yang merupakan kehilangan gaya prategang jangka pendek antara lain akibat perpendekan elastis beton, dudukan angkur, dan friksi. Penjelasan dari ketiga hal yang menyebabkan kehilangan gaya prategang di atas dijabarkan dalam penjelasan berikut.

a. Perpendekan elastis beton (ES)

Nawy (2001) menyatakan bahwa beton memendek pada saat gaya prategang bekerja padanya. Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya. Ilustrasi perpendekan elastis beton dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Perpendekan Elastis Beton

(Sumber : Nawy, 2001)

Menurut Nawy (2001), di balok pascatarik, kehilangan akibat perpendekan elastis bervariasi dari nol jika semua tendon didongkrak secara simultan. Jika n adalah banyaknya tendon atau pasangan tendon yang ditarik secara sekuensial, maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \quad (3.34)$$

Yang mana j merupakan nomor operasi pendongkrakan. Pada kondisi tersebut, tendon yang ditarik terakhir tidak mengalami kehilangan akibat perpendekan, sedangkan tendon yang ditarik pertama mengalami banyak kehilangan gaya prategang.

b. Kehilangan karena dudukan angker

Nawy (2001) menyatakan bahwa kehilangan karena dudukan angker pada komponen struktur pascatarik diakibatkan adanya blok-blok pada angker pada saat gaya pendongkrak ditransfer ke angker. Cara mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan. Persamaan yang dipakai untuk menghitung kehilangan gaya akibat dudukan angker adalah sebagai berikut.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} \quad (3.35)$$

dengan :

Δf_{pA} = kehilangan gaya prategang akibat dudukan angker

Δ_A = besar gelincir angkur

L = panjang tendon

E_{ps} = modulus elastisitas baja prategang

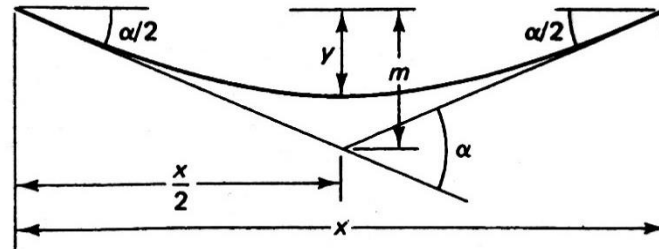
c. Kehilangan akibat friksi / gesekan

Menurut Lin dan Burns (2000a) Kehilangan prategang terjadi pada komponen struktur pascatarik akibat adanya gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari alinyemen tendon, yang disebut efek kelengkungan, dan deviasi lokal di dalam alinyemen tendon yang disebut efek “*wobble*”. Dalam tugas akhir ini metode penarikan baja prategang yang digunakan adalah pascatarik dengan penarikan dilakukan pada dua sisi gelagar, sehingga persamaan yang dipakai untuk menghitung kehilangan gaya prategang adalah sebagai berikut.

$$\Delta f_{pF} = f_1 (1 - e^{-\mu\alpha - KL}) \quad (3.36)$$

$$\alpha = \frac{8y}{x} \quad (3.37)$$

Nomenklatur untuk persamaan 3.37 dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 19 Nomenklatur untuk Persamaan 3.37
(Sumber : Lin dan Burns, 2000a)

Dengan penjelasan notasi sebagai berikut.

Δf_{pF} = kehilangan gaya prategnag akibat gesekan kabel.

f_1 = tegangan awal tendon.

μ = koefisien gesek antara tendon dan salurannya.

α = sudut tendon.

K = koefisien *wobble*, dapat dilihat pada Tabel 3.5.

L = panjang tendon.

Tabel 3. 5 Koefisien Friksi Tendon Pasca Tarik

			Koefisien <i>wobble</i> K (1/m)	Koefisien friksi μ
		Tendon Kawat		
		Batang kekuatan tinggi <i>strand</i> 7 kawat	0,0033-0,0049	0,15-0,25
			0,0033-0,0020	0,08-0,30
			0,0016-0,0066	0,15-0,25
Tendon tanpa lekatan	<i>Mastic coated</i>	Tendon kawat	0,0033-0,0066	0,05-0,15
		<i>strand</i> 7 kawat	0,0033-0,0066	0,05-0,15
	<i>Pre greased</i>	Tendon kawat	0,0010-0,0066	0,05-0,15
		<i>strand</i> 7 kawat	0,0010-0,0066	0,05-0,15

(Sumber : Lin dan Burns, 2000a)

2. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Panjang

Berbeda dengan kehilangan gaya prategang jangka pendek, kehilangan gaya prategang jangka panjang akan terus bertambah seiring dengan pertambahan usia gelagar prategang. Hal yang menyebabkan kehilangan gaya prategang jangka panjang adalah relaksasi tegangan baja, rangkak dan susut.

a. Relaksasi tegangan baja (R)

Menurut Nawy (2001), tendon *stress-relieved* mengalami kehilangan pada gaya prategang sebagai akibat dari perpanjangan konstan terhadap waktu. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan, melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang f_{pt}/f_{py} . Kehilangan tegangan seperti ini disebut relaksasi tegangan.

Persamaan kehilangan gaya prategang akibat relaksasi tendon adalah sebagai berikut.

$$\Delta f_{pR} = f_{ps} \cdot \frac{\log t}{10} \cdot \left(\frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (3.38)$$

dengan :

Δf_{pR} = kehilangan prategang akibat

f'_{pi} = tegangan awal di baja yang dialami elemen beton

t = interval waktu antara waktu penarikan sampai akhir interval(jam)

f_{py} = kuat leleh tendon prategang

Untuk *strand low relaxation*, pembagi “10” diganti dengan “45”.

b. Kehilangan yang disebabkan oleh rangkak (CR)

Nawy (2001) menyatakan bahwa rangkak adalah peningkatan ragangan terhadap waktu akibat beban yang terus menerus bekerja. Deformasi awal akibat beban adalah regangan elastis, sementara tegangan tambahan akibat beban yang sama yang terus menerus bekerja adalah regangan rangkak.

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \quad (3.39)$$

dengan :

K_{CR} = 2,0 untuk komponen struktur pratarik (Nawy, 2001)

= 1,6 untuk komponen struktur pascatarik (Nawy, 2001)

f_{cs} = tegangan beton pada pusat berat baja segera setelah transfer

f_{csd} = tegangan beton pada pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan

E_{ps} = modulus elastisitas baja prategang

E_c = modulus elastisitas beton

n = rasio modulus antara baja *prestress* dengan balok beton

c. Kehilangan yang disebabkan oleh susut (*SH*)

Menurut Nawy (2001), seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan.

Regangan susut dengan perawatan basah,

$$(\epsilon_{SH})_t = \frac{t}{35+t} \cdot (\epsilon_{SH})_u \quad (3.40)$$

Kehilangan gaya prategang akibat susut ,

$$\Delta f_{pSH} = (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \quad (3.41)$$

dimana :

Δf_{pSH} = kehilangan gaya prategang akibat susut

$(\epsilon_{SH})_t$ = regangan susut

$(\epsilon_{SH})_u$ = regangan susut ultimit

E_{ps} = modulus elastisitas baja prategang

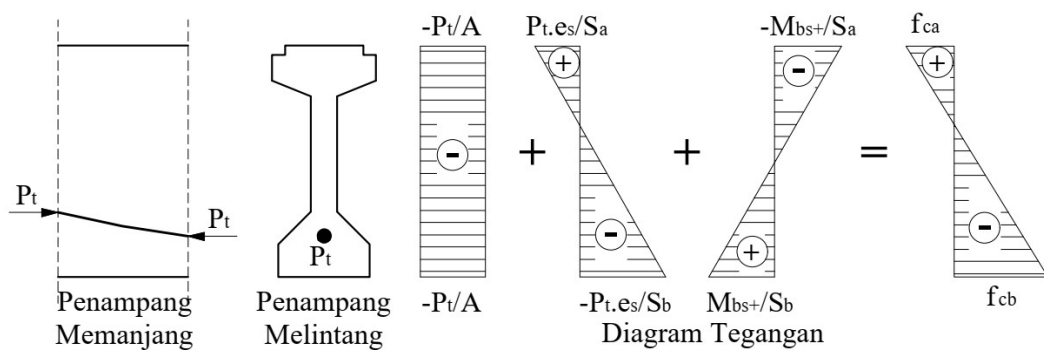
t = waktu (hari)

3.5.6 Kontrol Tegangan

Kontrol tegangan pada balok prategang perlu dilakukan untuk memastikan tegangan yang terjadi pada penampang balok prategang tidak melebihi dari tegangan yang diijinkan. Tegangan pada balok prategang dihitung dalam beberapa kondisi sesuai dengan tahapan pelaksanaan gelagar prategang. Kondisi-kondisi tersebut adalah sebagai berikut.

1. Keadaan Awal (Saat Transfer)

Diagram tegangan beton pada saat transfer dapat dilihat pada Gambar 3.20 dengan tegangan dapat dihitung dengan Persamaan 3.42 dan Persamaan 3.43.



Gambar 3. 20 Diagram Tegangan pada Saat Transfer

Tegangan di serat atas

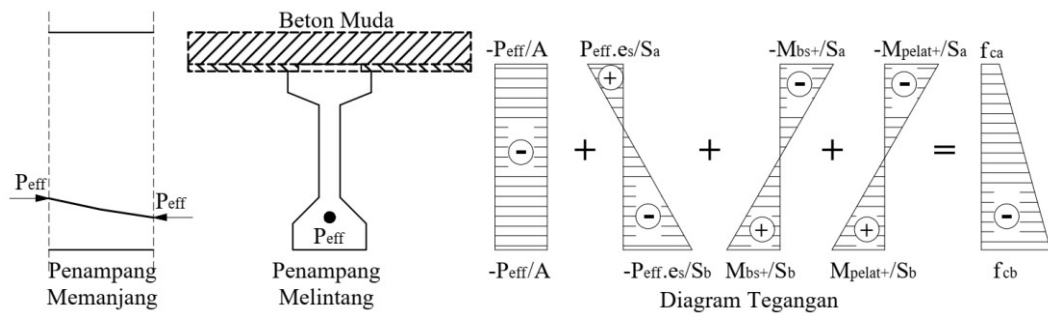
$$f_{ca} = \frac{-P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{balok}}{S_a} \quad (3.42)$$

Tegangan di serat bawah

$$f_{cb} = \frac{-P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{balok}}{S_b} \quad (3.43)$$

2. Keadaan Setelah Pelat Lantai Selesai Dicor (Beton Muda)

Diagram tegangan beton pada keadaan setelah pelat lantai selesai dicor dapat dilihat pada Gambar 3.21 dengan tegangan dapat dihitung dengan Persamaan 3.44 dan Persamaan 3.45.



Gambar 3. 21 Diagram Tegangan pada Keadaan Setelah Pelat Lantai Selesai Dicur (Beton Muda)

Tegangan di serat atas

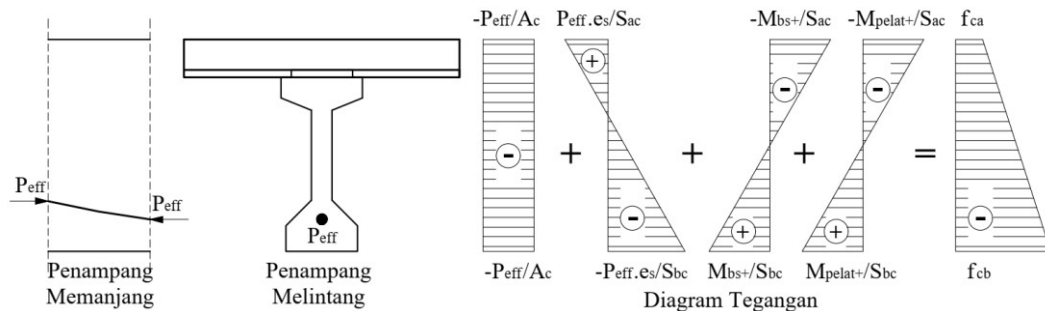
$$f_a = \frac{-P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff}e_s}{S_a} - \frac{M_{balok+pelat}}{S_a} \quad (3.44)$$

Tegangan di serat bawah

$$f_b = \frac{-P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff}e_s}{S_b} + \frac{M_{balok+pelat}}{S_b} \quad (3.45)$$

3. Keadaan Setelah Pelat dan Balok Menjadi Komposit

Diagram tegangan beton pada keadaan setelah pelat dan balok menjadi komposit dapat dilihat pada Gambar 3.22 dengan tegangan dapat dihitung dengan Persamaan 3.46 sampai Persamaan 3.48.



Gambar 3. 22 Diagram Tegangan pada Keadaan Setelah Pelat dan Balok Menjadi Komposit

Tegangan beton di serat atas pelat

$$f_{ac} = \frac{-P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e'_s}{S_{ac}} - \frac{M_{balok+pelat}}{S_{ac}} \quad (3.46)$$

Tegangan beton di serat atas balok

$$f'_{ac} = \frac{-P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e'_s}{S'_{ac}} - \frac{M_{balok+pelat}}{S'_{ac}} \quad (3.47)$$

Tegangan beton di serat bawah balok

$$f_{bc} = \frac{-P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e'_s}{S_{bc}} + \frac{M_{balok+pelat}}{S_{bc}} \quad (3.48)$$

3.5.7 Kekuatan Batas Lentur (*Ultimate Flexural Capacity*)

Kekuatan batas lentur *PCI-Girder* adalah kapasitas maksimum *PCI-Girder* dalam menahan momen yang terjadi akibat beban. Tegangan tulangan prategang saat M_n dicapai dihitung dengan persamaan berikut.

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p \rho_p f_{pu}}{\beta_1 f'_c} \right] \quad (3.49)$$

Gaya tarik tendon prategang :

$$T = A_p \times f_{ps} \quad (3.50)$$

Luas blok tekan beton :

$$A_{cc} = \frac{T}{0.85 f'_c} \quad (3.51)$$

Mencari nilai γ_p

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} \quad (3.52)$$

Setelah didapatkan nilai f_{py}/f_{pu} , γ_p dapat diketahui dari Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Nilai γ_p

$\gamma_p = 0,55$ untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0,80$
$\gamma_p = 0,40$ untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0,85$
$\gamma_p = 0,28$ untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0,90$

(Sumber : Nawy, 2001)

Rasio tulangan prategang :

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} \quad (3.53)$$

Dimana penjelasan dari notasi yang digunakan adalah sebagai berikut.

A_p = luas tendon prategang,

A_c = luas penampang balok beton,

3.5.8 Lendutan dan *Chamber*

Gaya yang bekerja akan menyebabkan lendutan pada gelagar prategang. Berat sendiri dan gaya luar yang bekerja pada gelagar akan menyebabkan lendutan ke bawah, sedangkan gaya prategang akan menyebabkan lendutan ke atas (*chamber*). Kontrol lendutan dilakukan pada saat transfer dan servis. Pada saat transfer, dimana gaya yang bekerja adalah gaya prategang dan berat sendiri, akan terjadi lendutan ke atas (*chamber*) akibat gaya prategang pada gelagar. Pada saat servis, gaya-gaya luar akan menyebabkan lendutan ke bawah pada gelagar. Lendutan yang terjadi tidak boleh melebihi $L/240$, dimana L adalah panjang bentang gelagar.

1. Balok Sederhana (*Simple Beam*)

a. Lendutan

Lendutan yang terjadi pada balok sederhana dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{Q \cdot L^4}{E_c \cdot I} \quad (3.54)$$

b. *Chamber*

Perhitungan *chamber* dan lendutan menggunakan persamaan yang sama, akan tetapi gaya prategang harus diubah menjadi beban merata terlebih dahulu.

Beban merata akibat gaya prategang.

$$Q_p = \frac{8 \cdot P_i \cdot e_s}{L^2} \quad (3.55)$$

Chamber pada balok sederhana.

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{Q_p \cdot L^4}{E_c \cdot I} \quad (3.56)$$

2. Balok Menerus (*Continuous Beam*)

a. Lendutan

Lendutan pada balok menerus dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\delta = \frac{1}{185} \frac{Q \cdot L^4}{E_c \cdot I} \quad (3.57)$$

b. *Chamber*

Beban merata akibat gaya prategang

$$Q_p = \frac{8 \cdot P_i \cdot e_s}{L^2} \quad (3.58)$$

Chamber pada balok menerus dapat dihitung dengan persamaan berikut.

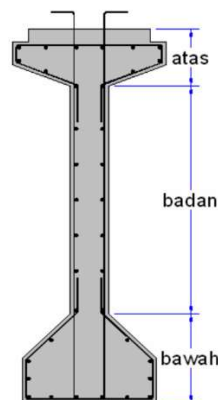
$$\delta = \frac{1}{185} \frac{Q_p \cdot L^4}{E_c \cdot I} \quad (3.59)$$

dimana :

- δ = lendutan pada gelagar
- w = baban merata yang bekerja pada gelagar
- L = panjang bentang gelagar
- E_c = modulus elastisitas gelagar prategang
- I = momen inersia dalam arah sumbu x
- Q_p = beban merata akibat gaya prategang
- P_i = gaya prategang yang diterima gelagar
- e_s = eksentrisitas tendon

3.5.9 Tulangan non Prategang

Tulangan non prategang dihitung dengan cara mengalikan ρ rencana dengan luas penampang balok, dimana dalam profil I dibagi dalam 3 bagian yaitu bagian atas, bagian badan, dan bagian bawah seperti pada Gambar 3.23.



Gambar 3. 23 Bagian-Bagian Gelagar Profil I

(Sumber : Noer Ilham, 2008, 15 Maret 2017)

Persamaan untuk menentukan jumlah tulangan non prategang dapat dilihat pada persamaan 3.60 dan 3.61. Berdasarkan RSNI-T-12-2004 (2004) rasio tulangan non prategang minimum adalah sebagai berikut.

$$\rho = 0,04 \cdot \frac{f_c}{f_y} \quad (3.60)$$

Luas tulangan non prategang yang diperlukan

$$A_s = \rho \cdot A \quad (3.61)$$

3.5.10 Tulangan Geser Balok Prategang

Gaya geser yang terjadi pada balok prategang berubah dimana gaya geser paling besar terjadi pada daerah dekat tumpuan dan paling kecil terjadi pada tengah bentang. Untuk itu penulangan geser pada balok prategang juga berbeda pada setiap titik dalam satu bentang balok.

Berdasarkan RSNIT-12-2004, kuat geser dari beton dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_c = \left(1 + \frac{0,3 \cdot N_u}{A_g} \right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_w \cdot d \quad (3.62)$$

Berdasarkan RSNIT-12-2004, faktor reduksi geser $\phi = 0,7$.

Tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu aksial dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (3.63)$$

Ketentuan dari persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$s_{max} = \frac{d}{2}; \text{ atau } 600 \text{ mm (diambil yang terkecil) bila } V_s \leq \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (3.64)$$

$$s_{max} = \frac{d}{4}; \text{ atau } 300 \text{ mm (diambil yang terkecil) bila } V_s > \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (3.65)$$

$$\text{Namun, } V_s \text{ tidak boleh lebih besar dari } \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (3.66)$$