BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh M. Noer Ilham (2010) tentang perhitungan *concrete prestressed box girder* Kentungan *fly over*, Yogyakarta. Dimana analisa yang dilakukan menggunakan *single sel box* dengan tahap analisa yaitu analisa pembebanan struktur, analisa momen akibat beban yang bekerja, analisa kuat geser yang terjadi akibat beban, penentuan jarak tendon, perhitungan kehilangan gaya prategang, kontrol tegangan dan lendutan *box girder* serta perhitungan penulangan *box girder.*

Penelitian yang dilakukan oleh Fajar Titiono (2014) tentang perencanaan jembatan Gayam Kabupaten Blitar dengan *box girder prestressed* sistem kantilever. Dimana metode yang digunakan untuk kontruksi *box girder* tersebut dengan *cast in situ* (pengecoran di lokasi) menggunakan *form traveller* .

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Jembatan

Pengertian jembatan secara umum adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah yang dalam, alur sungai, danau, saluran irigasi, kali, jalan kereta api, jalan raya yang melintang tidak sebidang dan lain-lain.

Jenis jembatan berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi dan tipe struktur sekarang ini telah mengalami perkembangan pesat sesuai dengan kemajuan jaman dan teknologi, mulai dari yang sederhana sampai pada konstruksi yang mutakhir.

- Berdasarkan fungsinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :
  1) Jembatan jalan raya (*highway bridge*),
  2) Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*),
  3) Jembatan pejalan kaki atau penyeberangan (*pedestrian bridge*).
- Berdasarkan lokasinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :
  1) Jembatan di atas sungai atau danau,
  2) Jembatan di atas lembah,
  3) Jembatan di atas jalan yang ada (*fly over*),
  4) Jembatan di atas saluran irigasi/drainase (*culvert*),
  5) Jembatan di dermaga (*jetty*).
- Berdasarkan bahan konstruksinya, jembatan dapat dibedakan menjadi beberapa macam, antara lain :
  1) Jembatan kayu (*log bridge*),
  2) Jembatan beton (*concrete bridge*),
  3) Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*),
  4) Jembatan baja (*steel bridge*),
  5) Jembatan komposit (*compossite bridge*).
- Berdasarkan tipe strukturnya, jembatan dapat dibedakan menjadi beberapa macam, antara lain :
  1) Jembatan plat (*slab bridge*),
  2) Jembatan plat berongga (*voided slab bridge*),
  3) Jembatan gelagar (*girder bridge*),
  4) Jembatan rangka (*truss bridge*),
  5) Jembatan pelengkung (*arch bridge*),
  6) Jembatan gantung (*suspension bridge*),
  7) Jembatan kabel (*cable stayed bridge*),
  8) Jembatan cantilever (*cantilever bridge*).

2.2.2 Pemilihan Tipe Jembatan

Tabel 2.1 - Bentang maksimum jembatan untuk berbagai jenis dan bahan *(mnoerilham.blogspot.com)*

BAHAN	JENIS	BENTANG MAX. (m)
Beton	*Culvert*	4.00 – 6.00
	Slab bridge	6.00 – 8.00
	T-Girder, I-Girder	6.00 – 25.00
Beton Prategang	*PCI-Girder*	15.00 – 35.00
	Prestressed Box Girder	40.00 – 50.00
Baja	*Truss bridge*	60.00 – 100.00
Komposit	*Compossite bridge*	10.00 – 40.00

Aspek-aspek pemilihan tipe jembatan (M. Noer Ilham, 2010) :

- Kekuatan dan stabilitas struktur
- Ekonomis
- Kenyamanan
- Durabilitas (Keawetan dan kelayakan jangka panjang)
- Hemat pemeliharaan
- Estetika
- Dampak lingkungan pada tingkat wajar/ minimal
- Kemudahan dan kecepetan pelaksanaan

2.2.3 Klasifikasi Jalan

Untuk perencanaan jembatan didasarkan dengan peraturan untuk Klasifikasi jalan yang ditetapkan oleh Dirjen Pekerjaan Umum Dinas Bina Marga.

2.2.3.1 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi

Klasifikasi jalan di Indonesia berdasarkan peraturan perundangan yang berlaku antara lain :

1. Jalan Arteri, adalah jalan umum yang berfungsi untuk melayani angkutan utama dengan ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rencana > 60 km/jam, lebar badan jalan ≤ 11 m, kapasitas jalan lebih besar daripada volume lalu lintas rata-rata, tidak boleh terganggu oleh kegiatan lokal, dan jalan primer tidak terputus, dan sebagainya.
2. Jalan Kolektor adalah jalan yang digunakan untuk melayani angkuatan pengumpul / pembagi dengan ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rencana > 40 km/jam, lebar badan jalan > 7 m, kapasitas jalan lebih besar atau sama dengan volume lalu lintas rata-rata, tidak boleh terganggu oleh kegiatan lokal, dan jalan primer tidak terputus, dan sebagainya.
3. Jalan Lokal adalah jalan umum yang digunakan untuk melayani angkutan setempat dengan ciri perjalanan dekat, kecepatan rencana > 40 km/jam, lebar jalan > 5 m.
4. Jalan Lingkungan adalah jalan umum yang digunakan untuk melayani angkutan lingkungan dengan ciri perjalanan jarak dekat, dan kecepatan rata-rata rendah.

2.2.3.2 Klasifikasi Berdasarkan Muatan Sumbu

Jenis klasifikasi jalan di Indonesia juga dikelompokkan berdasarkan muatan sumbu antara lain jalan kelas I, jalan kelas II, jalan kelas IIIA, jalan kelas IIIB, dan jalan kelas IIIC. Berikut penjelasan dari klasifikasi jalan di Indonesia.

1. Jalan kelas I adalah jalan arteri yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2500 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 18000 milimeter dan muatan sumbu terberat yang diizinkan lebih besar dari 10 ton, yang saat ini masih belum digunakan di Indonesia namun sudah mulai dikembangkan di berbagai negara maju seperti Perancis yang telah mencapai muatan sumbu terberat sebesar 13 ton.
2. Jalan kelas II adalah jalan arteri yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi dari 2500 mm. Ukuran

panjang tidak melebihi 18000 mm dan muatan sumbu terberat yang diizinkan 10 ton. Jalan kelas ini merupakan jalan yang sesuai untuk angkutan peti kemas.

3. Jalan kelas III A adalah jalan arteri atau kolektor yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2500 mm, ukuran panjang tidak melebihi 18000 mm dan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.
4. Jalan kelas III B adalah jalan kolektor yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2500 mm, ukuran panjang tida melebihi 12000 mm. dan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.
5. Jalan kelas III C adalah jalan lokal dan lingkungan yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2100 mm, ukuran panjang tidak melebihi 9000 mm dan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.

2.2.4 Beton prategang

2.2.4.1 Pengertian

a. Menurut PBI – 1971

   Beton prategang adalah beton bertulang dimana telah ditimbulkan tegangan-tegangan intern dengan nilai dan pembagian yang sedemikian rupa hingga tegangan-tegangan akibat beton-beton dapat dinetralkan sampai suatu taraf yang diinginkan.

b. Menurut *Draft* Konsensus Pedoman Beton 1998

   Beton prategang adalah beton bertulang yang dimana telah diberikan tegangan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat pemberian beban yang bekerja.

c. Menurut ACI

   Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal.

d. Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar (akibat *stressing*) dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat

mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. (T.Y Lin).

e. Dengan memanfaatkan momen sekunder akibat *stressing* untuk mengimbangi momen akibat beban luar tinggi komponen beton prategang berkisar antara 65-80% tinggi komponen beton bertulang pada bentang dan beban yang sama, dengan demikian beton prategang membutuhkan lebih sedikit beton dan sekitar 20-35% banyaknya tulangan. (Edward G. Nawy).

2.2.4.2 Jenis *Girder*

1. Balok I

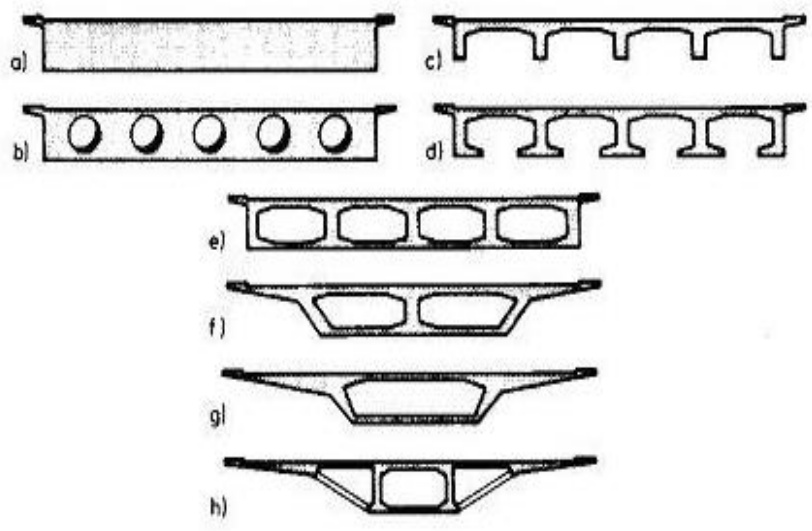
Girder dengan bentuk balok I sering disebut dengan *PCI Girder* (yang dibuat dari material beton). *Girder* ini dapat terbuat dari bahan komposit ataupun bahan non komposit, dalam memilih hal ini perlu dipertimbangkan berbagai hal seperti jenis kekuatan yang diperlukan dan biaya akan akan dikeluarkan. (Fadly Fauzie, 2012)

Gambar 2.1 - PCI *Girder*
(http://kawansipil.blogspot.co.id)

2. *Box Girder*

Box girder sangat cocok digunakan untuk jembatan bentang panjang. Biasanya *box girder* didesain sebagai struktur menerus di atas pilar karena *box girder* dengan beton prategang dalam desain biasanya akan menguntungkan untuk bentang menerus. *Box girder* sendiri dapat berbentuk trapesium ataupun

kotak. Namun bentuk trapesium lebih digemari penggunaannya karena akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibanding bentuk kotak.



Keterangan :
Single sel persegi (a), Multi sel persegi (b, c, d, e), Single sel trapesium (g), Multi sel trapesium (f,h).

Gambar 2.2 - Evolusi *Box Girder*
(http://uptodateproperty.blogspot.co.id)

Seiring meningkatnya panjang bentang, tinggi elemen penampang balok *box* juga meningkat. Diketahui bahwa pusat dekat bahan gravitasi memberikan kontribusi sangat sedikit untuk lentur dan karenanya dapat dihapus. Pelat bawah balok disediakan kapasitas kekuatan tarik dan pelat atas untuk menahan tekan. Sehingga pelat atas dan bawah membentuk kerja sama untuk menahan lentur.

Akibat lebar jembatan meningkat diperlukan lebih banyak jumlah gelagar memanjang sehingga mengurangi kekakuan balok dalam arah melintang dan lendutan melintang relatif tinggi. Jaring balok bisa dibuka menyebar secara radial dari plat atas. balok bagian bawah tidak akan lagi berada di posisi aslinya. Untuk tetap dalam posisi semula di bagian bawah harus diikat bersama-sama yang menyebabkan terbentuknya *box girder* pertama. Bentang yang panjang dengan *deck* yang lebih luas dan pembebanan eksentrik pada penampang akan menyebabkan lendutan arah longitudinal dan transversal yang menyebabkan distorsi berat penampang. Oleh karena itu jembatan harus

memiliki kekakuan torsi yang tinggi untuk melawan distorsi penampang dek untuk minimum.

Dengan demikian *box girder* lebih cocok untuk bentang yang lebih besar dan lebar. *Box girder* elegan dan ramping. Ekonomis dan estetika menyebabkan evolusi *cantilevers* pada sayap atas. Dimensi sel dapat dipengaruhi oleh kondisi pratekan. (Fadly Fauzie, 2012).

3. Balok T

Balok T ekonomis untuk bentang 40-60 ft. Namun pada struktur jembatan miring, perancangan balok T memerlukan rangka kerja yang lebih rumit. Perbandingan tebal dan bentang struktur pada balok T yang dianjurkan adalah sebesar 0,07 untuk struktur bentang sederhana dan 0,065 untuk struktur bentang menerus. (Fadly Fauzie, 2012).

Gambar 2.3 - *Girder* T
(http://www.ilmutekniksipil.com)

2.2.4.3 Metode Pratekan

Untuk memberikan tekanan pada beton prategang dilakukan sebelum atau setelah beton dicetak / dicor. Kedua kondisi tersebut mebedakan sistem pratekan, yaitu *Pre-Tension* (pratarik) dan *Post-Tension* (pasca tarik).

- Pratarik

Pada cara ini, tendon pertama-tama ditarik dan diangkur pada abutmen tetap. Beton dicor pada cetakan yang sudah disediakan dengan melingkupi

tendon yang sudah ditarik tersebut. Jika kekuatan beton sudah mencapai yang disyaratkan maka tendon dipotong atau angkurnya dilepas. Pada saat baja yang ditarik berusaha untuk berkontraksi, beton akan tertekan. Pada cara ini tidak digunakan selongsong tendon.

- Pasca tarik

Dengan cara yang sudah disediakan, beton dicor di sekeliling selongsong (*ducts*). Posisi selongsong diatur sesuai dengan bidang momen dari struktur. Biasanya baja tendon tetap berada didalam selongsong selama pengecoran. Jika beton sudah mencapai kekuatan tertentu, tendon ditarik. Tendon bisa ditarik disatu sisi dan sisi yang lain diangkur. Atau tendon ditarik dua sisi dan diangkur secara bersamaan. Beton menjadi tertekan setelah pengangkuran.

2.2.4.4 Tahap Pembebanan

Tidak seperti beton bertulang, beton pratekan mengalami beberapa tahap pembebanan. Pada setiap tahap pembebanan harus dilakukan pengecekan atas kondisi serat tertarik dari setiap penampang. Pada tahap tersebut berlaku tegangan ijin yang berbeda-beda sesuai kondisi beton atau tendon. Ada dua tahap pembebanan pada beton pratekan, yaitu *Transfer* dan *Service*.

- *Transfer*

Tahap *transfer* adalah tahap pada saat beton sudah mulai mengering dan dilakukan penarikan kabel prategang. Pada saat ini biasanya yang bekerja hanya beban mati struktur, yaitu berat sendiri struktur ditambah beban pekerja dan alat. Pada saat ini beban hidup belum bekerja sehingga momen yang bekerja adalah minimum, sementara gaya yang bekerja adalah maksimum karena belum ada kehilangan gaya prategang.

- *Service*

Kondisi *Service* (servis) adalah kondisi pada saat beton pratekan digunakan sebagai komponen struktur. Kondisi ini dicapai setelah semua kehilangan gaya prategang dipertimbangkan. Pada saat itu beban luar pada kondisi yang maksimum sedangkan gaya pratekan mendekati harga minimum.
Pada setiap tahapan di atas ditentukan hasil analisis untuk dievaluasi. Hasil analisa bisa berupa perhitungan tegangan atau kontrol terhadap harga,

misalnya lendutan terhadap lendutan ijin, nilai retak terhadap suatu nilai batas, dan lain sebagainya. Perhitungan tegangan dilakukan untuk desain terhadap kekuatan, sedangkan kontrol terhadap harga dilakukan untuk desain kekuatan, daya layan, ketahanan terhadap api ataupun tahap batas yang lain. Perhitungan untuk tegangan bisa dilakukan dengan pendekatan kombinasi beban dan konsep kopel internal (*Internal Couple Concept*) atau metode beban penyeimbang (*Load Balancing Method*).

2.2.4.5 Prosedur Perencanaan

Ada dua metode perencanaan struktur beton, yaitu metode beban kerja (*working stress method*) dan metode beban batas (*limit states method*). Metode beban kerja dilakukan dengan meghitung tegangan yang terjadi dan membandigkan dengan tegangan ijin yang bersangkutan. Apabila tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diijinkan maka dinyatakan aman. Dalam menghitung tegangan, semua beban tidak dikalikan dengan faktor beban.

Metode beban kerja didasarkan pada batas-batas tertentu yang bisa dilampaui oleh suatu sistem struktur. Batas-batas tersebut, terutama adalah kekuatan, kemampuan layan, keawetan, ketahanan terhadap api, ketahanan terhadap beban kelelahan dan persyaratan khusus yang berhubungan dengan sistem struktur tersebut. Setiap batas dinyatakan aman apabila aksi rencana lebih kecil dari kapasitas komponen struktur. Aksi rencana dihitung dengan menggunakan faktor reduksi kekuatan. Peraturan beton saat ini menggunakan pendekatan ini, termasuk di Indonesia, SNI 03-2874-2002 dan telah diperbarui dengan SNI 2874 : 2013.

Beban pada struktur umumnya terdiri dari beban mati, beban hidup, beban angin, prategang, gempa, tekanan tanah, tekanan air, dan lain-lain. Beban yang digunakan dalam desain struktur dikalikan dengan suatu faktor beban dalam suatu kombinasi pembebanan. Berikut ini kombinasi pembebanan dari beberapa peraturan untuk batas kekuatan (*Strength Limit States*).

a. SNI 2874 : 2013 kode Indonesia.

Beban Mati	: U = 1,4 D
Beban Mati dan Hidup	: U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A atau R)
Beban Angin	: U = 1,2 D + 1,0 L + 1,6 W + 0,5 (A atau R)
Gempa	: U = 1,2 D + 1,0 L ± 1,0 E atau 0,9 D ± 1,0 E

b. ACI 318-83 (1983) Peraturan Amerika Serikat.

Beban Mati dan Hidup	: U = 1,4 D + 1,7 L
Beban Angin	: U = 0,75 (1,4 D + 1,7 L + 1,7 W) atau 0,9 D + 1,3 W
Gempa	: U = 0,75 (1,4 D + 1,7 L + 1,1 E) atau 0,9 G + 1,1 E
Tekanan Tanah	: U = 1,4 D + 1,7 L + 1,7 E atau 0,9 D + 1,7 E

2.2.4.6 Kehilangan Prategang

Gaya prategang pada beton mengalami proses reduksi yang progresif (pengurangan secara berangsur-angsur) sejak gaya prategang awal diberikan, sehingga tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahapan pembebanan, yaitu dari tahapan *transfer* gaya prategang ke beton sampai ke berbagai tahapan prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja hingga mencapai kondisi ultimit.

Pada dasarnya nilai masing-masing kehilangan gaya prategang adalah kecil, tetapi apabila dijumlahkan dapat menyebabkan penurunan gaya *jacking* yang signifikan, yaitu ± 15% - 25%, sehingga kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan. Beberapa hal yang harus diperhatikan untuk meminimalkan kehilangan gaya prategang adalah :

1. Mutu beton yang digunakan minimal 40 MPa untuk memperkecil rangkak.
2. Tendon yang digunakan adalah mutu tinggi yang memiliki relaksasi rendah.

Kehilangan gaya prategang dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain (Edward G.Nawy) :

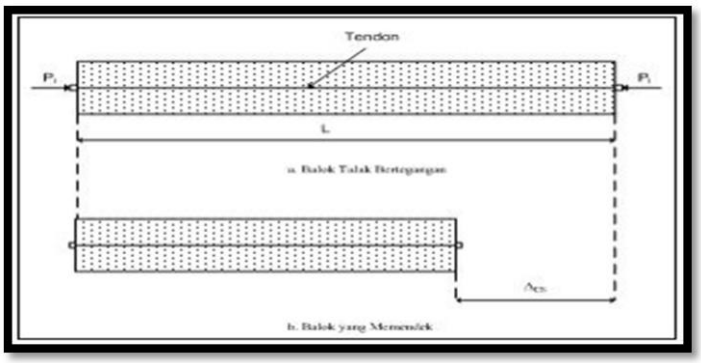
1. Perpendekan elastis beton

Beton memendek pada saat gaya prategang bekerja. Hal ini disebabkan karena tendon yang melekat pada beton sekitarnya secara simultan juga

memendek, sehingga tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya.

a. Elemen Pratarik

Untuk elemen-eleman pratarik, gaya tekan yang dikerjakan pada balok oleh tendon menyebabkan perpendekan longitudinal pada balok seperti terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 - Perpendekan Elastis
(Ria Catur Yulianti , Modul Beton Prategang)

b. Elemen Pasca Tarik

Pada elemen-elemen pasca tarik, kehilangan akibat perpendekan elastis bervariasi dari nol jika semua tendon didongkrak secara simultan, hingga setengah dari nilai yang dihitung pada kasus pratarik dengan pendongkrak sekuensial digunakan, seperti pendongkrak dua tendon sekaligus.

Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis pasca tarik dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Es = f_c' x \frac{n.P_i}{A_c} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.1)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.2)$$

$$\Delta f_p = 0.5\, x\, \frac{E_s}{E_c} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

Es = Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis

f_c' = Tegangan pada penampang beton pada level baja prategang.

P_i = Gaya prategang awal

A_c = Luas penampang beton

E_s = Modulus elastisitas kabel / baja prategang

E_c = Modulus Elastisitas beton

2. Rangkak.

Rangkak adalah bertambahnya deformasi beton secara bertahap pada suatu tegangan tertentu. Deformasi yang berasal dari perilaku yang bergantung pada waktu ini merupakan fungsi dari besarnya beban yang bekerja, lama serta sifat beton yang meliputi proporsi campurannya, kondisi perawatan, umur elemen pada saat dibebani dan kondisi lingkungannya.

Untuk struktur dengan lekatan yang baik antara tendon dan beton (*bonded members*) kehilangan tegangan akibat rangkak dapat diperhitungkan dengan persamaan :

$$\Delta f_{cr} = K_{cr}.\frac{E_s}{E_c}.(f_{ci} - f_{cd}) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

Δf_{cr} = Kehilangan tegangan akibat rangkak

K_{cr} = Koefisien rangkak yang besarnya :

- 2 Untuk *Pre Tension*
- 1,6 Untuk *Post Tension*

E_s = Modulus elastisitas baja prategang

E_c = Modulus elastisitas beton

f_{ci} = Tegangan beton pada posisi / level baja prategang sesaat

f_{cd} = Tegangan beton pada pusat tendon akibat beban mati

3. Susut.

Susut pada beton disebabkan oleh menguapnya air pada adukan beton setelah dicor, yang mengakibatkan pengurangan volume. Susut pada beton mengakibatkan perpendekan kabel-kabel yang ditegangkan. Untuk komponen struktur pasca tarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena

sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pasca tarik.

Kehilangan tegangan akibat penyusutan beton dapat juga dihitung dengan persamaan berikut :

$$\Delta f_{SH} = \varepsilon_{sh} . E_s . K_{sh} \text{..... ... ... } (2.5)$$

$$\varepsilon_{sh} = 8{,}2 \text{ x } 10^{-6} \left(1 - 0.06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \text{ ... ...} (2.6)$$

Dimana :

Δf_{SH} = Kehilangan tegangan akibat susut beton

E_s = Modulus elastisitas baja prategang

ε_{sh} = Susut efektif

V = Volume beton dari suatu komponen struktur beton prategang

S = Luas permukaan dari komponen struktur beton prategang

RH = Kelembaban udara relatif

K_{sh} = Koefisien susut beton yang tergantung waktu antara akhir pengecoran dan pemberian gaya prategang.

Tabel 2.2 - Koefisien Susut (K_{sh}). *(Nawy, 2001)*

Selisih antara pengecoran dan prategang (hari)	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

4. Relaksasi tendon

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. Kehilangan tegangan seperti ini disebut relaksasi tegangan.

Peraturan SNI 2847 : 2013, dengan membatasi tegangan tarik di tendon sebagai berikut :

a. Akibat pengangkuran tendon 0.94 fp_y. Tetapi tidak lebih besar dari nilai

terkecil 0.8 f_{pu} dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon prategang atau perangkat angkur.

b. Sesaat setelah penyaluran gaya prategang 0.82 f_{py} tetapi tidak lebih besar dari 0.74 f_{pu}.
c. Tendon pasca tarik, pada daerah angkur dan sambungan, segera setelah penyaluran gaya 0.7 f_{pu}.

Dan nilai f_{py} dapat dihitung dari :

- Batang Prategang, $f_{py} = 0.8\, f_{pu}$
- Tendon *stress relieved,* $f_{py} = 0.85\, f_{pu}$
- Tendon relaksasi rendah, $f_{py} = 0.9\, f_{pu}$

Besarnya kehilangan tegangan pada baja prategang akibat relaksasi baja prategang dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$\Delta f_{RE} = C.\,[K_{re} - J(\Delta f_{SH} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{ES})] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.7)$$

Dimana :

Δf_{RE} = Kehilangan tegangan akibat ralaksasi baja prategang
Δf_{SH} = Kehilangan tegangan akibat susut beton
Δf_{CR} = Kehilangan tegangan akibat rangkak (*creep*)
Δf_{ES} = Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton
C = Faktor relaksasi yang besarnya tergantung jenis kawat baja prategang
K_{re} = Koefisien relaksasi yang tergantung jenis kawat baja prategang
J = Faktor waktu

Tabel 2.3 - Nilai faktor relaksasi baja prategang (*C*). (TY Lin Ned, H Burns)

f_{pi} / f_{pu}	Strand atau kawat *stress relieved*	Batang *stress relieved* atau Strand atau kawat relaksasi rendah
0,80		1,28
0,79		1,22
0,78		1,16
0,77		1,11
0,76		1,05
0,75	1,45	1,00
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,90
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,80
0,70	1,00	0,75
0,69	0,94	0,70
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49
0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37
0,60	0,49	0,33

Tabel 2.4 - Nilai faktor waktu (*J*) dan koefisien relaksasi baja prategang (K_{re}). (TY Lin Ned, H Burns)

Tipe Tendon	K_{re}	J
Strand atau kawat *stress relieved* derajat 1860 MPa	138	0,150
Strand atau kawat *stress relieved* derajat 1720 MPa	128	0,140
Kawat *stress relieved* derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	121	0,130
Strand relaksasi rendah derajat 1860 MPa	35	0,040
Kawat relaksasi rendah derajat 1720 MPa	32	0,037
Kawat relaksasi rendah derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	30	0,035
Batang *stress relieved* rendah derajat 1000 MPa	41	0,050

5. Friksi

Kehilangan prategang terjadi pada komponen struktur pasca tarik akibat adanya gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari *alinemen* tendon, yang disebut efek kelengkungan, dan deviasi lokal di dalam *alinemen* tendon, yang disebut efek *wobble*. Besarnya koefisien kehilangan sering dihitung dengan teliti dalam menyiapkan gambar kerja dengan memvariasikan tipe tendon dan ketepatan *alinemen* saluran. Efek kelengkungan dapat ditetapkan terlebih dahulu, sedangkan efek *wobble* merupakan hasil dari penyimpangan *alinemen* yang tidak disengaja atau yang tak dapat dihindari, karena saluran tidak dapat secara sempurna diletakkan.

Kehilangan tegangan friksional maksimum terjadi di ujung balok jika pendongkrakan dilakukan dari satu ujung. Dengan demikian, kehilangan akibat adanya gesekan bervariasi secara linier di sepanjang bentang balok dan dapat diinterpolasi untuk lokasi tertentu jika dikehendaki perhitungan yang lebih teliti.

Pada SNI 2847 : 2013 Kehilangan friksi yang dihitung harus didasarkan pada koefisien friksi *wobble* dan kurvatur yang ditentukan secara eksperimental. Untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat friksi digunakan pendekatan pada SNI 2847 : 2002 mengenai kehilangan gaya prategang akibat geseran pada tendon *post tension* (pasca tarik) harus dihitung dengan rumus :

$$P_s = P.e^{K.Lx + \mu.\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.8)$$

bila (K.Lx + μ.α) tidak lebih besar dari 0.30, maka pengaruh kehilangan akibat friksi boleh dihitung sebagai berikut :

$$P_s = P_x.(1 + K.L_x + \mu.\alpha) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.9)$$

Tabel 2.5 - Koefisien friksi tendon pasca tarik. (TY Lin Ned, H Burns)

		Jenis Baja Prategang	Koefisien *Wobble* (K)	Koefisien friksi (μ)
		Tendon kawat	0,0033 -0,0049	0,15 - 0,25
		batang kekuatan tinggi	0,0030 - 0,0020	0,08 - 0,30
		strand 7 kawat	0,0016 - 0,0066	0,15 - 0,25
Tendon tanpa lekatan	Mastic Coated	Tendon kawat	0,0033 - 0,0066	0,05 - 0,15
		strand 7 kawat	0,0033 - 0,0066	0,05 - 0,15
	Pregreassed	Tendon kawat	0,0010 - 0,0066	0,05 - 0,15
		strand 7 kawat	0,0010 - 0,0066	0,05 - 0,15

6. Pengangkuran

Kehilangan karena dudukan angkur pada komponen struktur pasca tarik diakibatkan adanya blok-blok pada angkur pada saat gaya *jacking* ditransfer ke angkur. Kehilangan ini juga terjadi pada landasan cetakan prategang pada komponen struktur pratarik akibat dilakukannya penyesuaian pada saat gaya prategang ditransfer ke landasan. Cara ini mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan. Pada umumnya besarnya kehilangan karena dudukan angkur bervariasi antara 1/4 *inch* – 3/8 *inch* untuk angkur dengan dua blok. Besar pemberian kelebihan tegangan yang dibutuhkan bergantung pada sistem pengangkuran yang digunakan karena setiap sistem mempunyai kebutuhan penyesuaian sendiri-sendiri, dan pembuatnya diharapkan mensuplai data mengenai gelincir yang dapat terjadi akibat penyesuaian angkur.

Karena pada penelitian ini metode yang digunakan adalah *post-tension*, maka untuk perhitungan kehilangan tegangan menggunakan perhitungan untuk *post-tension* dan koefisien yang digunakan juga menggunakan koefisien perhitungan untuk metode *post-tension*.

Besarnya perpanjangan total tendon adalah :

$$\Delta L = \frac{f_c'}{E_s} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.10)$$

Kehilangan gaya prategang akibat slip :

$$ANC = \frac{S}{\Delta L} \text{ x } 100\% \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

ANC = Prosentasi kehilangan gaya prategang akibat slip di angkur.

ΔL = Deformasi pada angkur

f_c' = Tegangan pada beton

E_S = Modulus elastisitas baja / kabel prategang

L = Panjang kabel

S = Harga rata-rata slip di angkur

2.2.4.7 Distribusi Tendon Prategang

Setiap panel pelat diasumsikan ditumpu secara menerus di sepanjang garis as kolom transversal. Asumsi yang juga digunakan sebagaimana disebutkan adalah bahwa panel *slab* tersebut berperilaku sebagai panel orthogonal yang terdiri dari dua balok lebar yang lebarnya sama dengan lebar panel yang ditumpu di sepanjang as kolom. Dengan demikian 100% dari beban yang akan diimbangi dipandang sebagai beban yang ditumpu oleh balok lebar tersebut di setiap arah yang saling tegak lurus.

Diketahui pula bahwa distribusi momen lateral tidak seragam di seluruh lebar panel, melainkan cenderung lebih terkonsentrasi pada kolom. Dengan demikian adalah wajar jika lebih banyak tendon diletakkan di lajur kolom dan menyebarkan sisanya di jalur tengah. Untuk bentang menerus 65-75% dari momen di masing-masing arah dipikul oleh jalur kolomnya masing-masing, dengan banyak dan luas total tendon yang dibutuhkan oleh momen total tetap dipertahankan.

Karena tendon memberikan beban ke bawah di titik-titik puncak yang menghubungkan profil-profil parabolik yang bersebelahan, maka reaksi ke

bawah yang terjadi harus diupayakan, sepanjang praktis dilakukan, ditahan oleh kolom, dinding, dan beban tendon ke atas agar didapatkan defleksi yang minimum dan kapasitas geser yang maksimum. Dengan demikian, distribusi tendon yang logis secara statika adalah distribusi dimana semua tendon di satu arah diletakkan di dekat kolom dan tendon di arah tegak lurusnya ditempatkan berjarak seragam di seluruh lebar bentangan.

2.2.4.8 Tegangan Izin Beton

Ada dua tahap utama dalam penentuan kemampuan layan struktur beton prategang. Tahap pertama adalah tahap *transfer* dimana kekuatan beton masih rendah, beban pada struktur masih minimum (hanya beban mati dan beban kosntruksi yang bekerja), sedangkan gaya prategang mencapai nilai puncaknya. Tahap kedua adalah ketika semua kehilangan sudah tercapai dan semua beban sudah bekerja, dengan nilai gaya prategang mencapai nilai terendah. Pada kedua tahap tersebut semua persyaratan harus dipenuhi.

Berdasarkan SNI 2847 : 2013 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung komponen lentur struktur beton prategang diklasifikasikan ke kelas U dimana tegangan serat terjauh (f_t) yang dihitung dalam kondisi tarik pada daerah tarik pratekan yang dihitung saat beban layan, dengan ft ≤ $0.62\sqrt{fc}$ diberikan tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur tidak boleh melebihi nilai sebagai berikut :

a. Pada saat *transfer* (sesaat sesudah penyaluran gaya prategang / sebelum terjadinya kehilangan prategang) :
   - Tegangan serat tekan terluar (σ_{ci}) = 0,6 f_{ci} ..... (2.12)
   - Tegangan serat tarik terluar (σ_{ti}) = $0,5\sqrt{f'ci}$ ..... (2.13)
b. Pada kondisi beban layan (sesudah memperhitungkan semua kehilangan tegangan yang terjadi)
   - Tegangan serat tekan terluar (σ_c) = 0,45 f_c ..... (2.14)
   - Tegangan serat tarik terluar (σ_t) = $0,62\sqrt{f'c}$ ..... (2.15)

2.2.4.9 Tegangan Ijin Tendon Prategang

Sesuai dengan Peraturan Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung SNI 2847 : 2013, tegangan tarik tendon prategang tidak boleh melebihi nilai berikut ini :

a. Tegangan ijin pada kondisi transfer gaya prategang

   Tegangan tarik baja prategang pada kondisi transfer tidak boleh melampaui nilai berikut :

   1) Akibat gaya penjangkaran tendon, sebesar 0,94 f_{py} tetapi tidak lebih besar dari 0,80 f_{pu} atau nilai maksimum yang direkomendasikan oleh fabrikator pembuat tendon prategang atau jangkar.
   2) Sesaat setelah transfer gaya prategang, sebesar 0,82 f_{py} tetapi tidak lebih besar dari 0,74 f_{pu}

b. Tegangan ijin pada kondisi batas layan

   Tegangan tarik baja prategang pada kondisi batas layan tidak boleh melampaui nilai berikut :

   1) Tendon pasca tarik, pada daerah jangkar (angkur) dan sambungan, sesaat setelah penjangakaran (pengangkuran) tendon, sebesar 0,7 f_{pu}
   2) Untuk kondisi layan sebesar 0,6 f_{pu}

2.2.4.10 Sifat-Sifat Bahan

a. Beton

Untuk beton pratekan diperlukan mutu beton yang tinggi (min K-300) karena mempunyai sifat penyusutan dan rangkak yang rendah mempunyai modulus elastisitas dan modulus tekan yang tinggi serta dapat menerima tegangan yang lebih besar dibandingkan beton mutu rendah. Sifat-sifat ini sangat penting untuk menghindarkan kehilangan tegangan yang cukup besar akibat sifat-sifat beton tersebut.

b. Baja Prategang

Baja mutu tinggi merupakan bahan yang umum dipakai pada struktur beton prategang. Baja untuk beton prategang terdiri dari :

- Kawat baja

  Kawat baja disediakan dalam bentuk gulungan, kawat dipotong dengan panjang tertentu dan dipasang di pabrik atau lapangan.
- Untaian kawat (*strand*)

  Kekuatan batas *strand* ada 2 jenis yaitu 1750 MPa dan 1860 MPa, yang lazim dipakai adalah *strand* dengan 7 kawat.

Tabel 2.6 - Spesifikasi baja prategang

(Angga Setiawan : Jurnal Perencanaan Balok Prategang Untuk Jembatan)

Jenis Baja Prategang	Diameter (mm)	Luas (mm^2)	Beban Putus (kN)	Tegangan Tarik (MPa)
Kawat Tunggal (*wire*)	3	7.1	13.5	1900
	4	12.6	22.1	1750
	5	19.6	31.4	1600
	7	38.5	57.8	1500
	8	50.3	70.4	1400
Untaian Kawat (*strand*)	9.3	54.7	102	1860
	12.7	100	184	1840
	15.2	143	250	1750
Kawat Batangan (*bar*)	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

2.2.4.11 Keunggulan Beton Prategang

Beton Prategang (*Prestressed concrete*) mempunyai beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan beton konvensional biasa, antara lain :

1. Kelebihan dari segi teknis
   - Terhindarnya retak terbuka di daerah tarik, sehingga beton prategang akan lebih tahan terhadap korosi.
   - Kedap air, bagus digunakan untuk proyek yang dekat dengan perairan.
   - Karena terbentuknya lawan lendut akibat gaya prategang sebelum beban rencana bekerja, maka lendutan akhir setelah beban rencana bekerja, akan lebih kecil dari pada beton bertulang biasa.

- Efisien karena dimensi penampang struktur akan lebih kecil atau langsing, sebab seluruh luas penampang dipergunakan secara efektif.
- Jumlah penggunaan baja jauh lebih sedikit dari pada jumlah berat besi penulangan pada konstruksi beton konvensional biasa.
- Ketahanan terhadap geser dan ketahanan terhadap puntirnya meningkat.

2. Kelebihan dari segi ekonomi

   Dari segi ekonomis beton prategang juga memiliki beberapa kelebihan antara lain :

   - Volume beton yang digunakan untuk produksi beton prategang lebih sedikit.
   - Jumlah baja / besi yang digunakan untuk produksi beton prategang sedikit.
   - Beton prategang akan lebih menguntungkan jika dibuat dalam jumlah besar.
   - Beton prategang hampir tidak memerlukan biaya pemeliharaan, lebih tahan lama karena dapat membuat balok dengan bentang yang lebih panjang.
   - Dengan menggunakan beton prategang bisa menghemat waktu pelaksanaan konstruksi.

Selain memiliki keuntungan-keuntungan, beton prategang juga memiliki kerugian-kerugian seperti :

- Material-material penyusunnya adalah material dengan mutu tinggi yang tentunya memiliki harga satuan yang lebih tinggi pula.
- Kemungkinan diperlukan acuan / bekisting yang lebih rumit.
- Membutuhkan pengangkuran ujung dan membutuhkan pelat landas.
- Upah buruh yang lebih tinggi karena membutuhkan buruh dengan *skill* yang lebih memadai.

- Dibutuhkan pengontrolan / pengendalian yang sangat ketat pada setiap tahapan pelaksanaan. Baik pengontrolan kualitas material dan alat, maupun skill manusia.
- Tidak bisa dilaksanakan hanya dengan peralatan seadanya seperti pada beton bertulang biasa.

2.2.5 Pembebanan Jembatan

Dalam merencanakan sebuah jembatan, terdapat tiga macam beban yang biasa digunakan dalam perhitungan. Dari beban inilah yang pada akhirnya akan menimbulakan gaya-gaya yang akan didistibusikan pada struktur di bawahnya. Beban-beban tersebut diantaranya :

2.2.5.1 Beban Akibat Aksi Tetap (SNI 1725 : 2016)

Aksi tetap terjadi dari beban sendiri, beban mati tambahan dan beban pengaruh pelaksanaan tetap.

a. Beban Sendiri

Berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya, termasuk dalam hal ini adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Adapun faktor beban yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 - Faktor beban untuk berat sendiri. *(SNI 1725 : 2016)*

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^{S})		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^{U})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton dicor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

b. Beban Mati Tambahan

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan.

c. Pengaruh tetap pelaksanaan

Pengaruh tetap pelaksanaan adalah beban yang disebabkan oleh metode dan urutan pelaksanaan pekerjaan jembatan. Beban ini biasanya mempunyai kaitan dengan aksi-aksi lainnya, seperti pra-penegangan dan berat sendiri. Dalam hal ini, pengaruh faktor ini tetap harus dikombinasikan dengan aksi-aksi tersebut dengan faktor beban yang sesuai.

2.2.5.2 Beban Akibat Aksi Lingkungan (SNI 1725 : 2016)

Besarnya beban rencana yang diberikan dalam standar ini dihitung berdasarkan analisis statistik dari kejadian-kejadian umum yang tercatat tanpa memperhitungkan hal khusus yang mungkin akan memperbesar pengaruh setempat. Perencana mempunyai tanggung jawab untuk mengidentifikasi kejadian-kejadian khusus setempat dan harus memperhitungkannya dalam perencanaan.

a. Beban angin

Beban angin harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Luas area yang diperhitungkan adalah luas area dari semua komponen, termasuk sistem lantai dan *railing* yang diambil tegak lurus terhadap arah angin. Arah ini harus divariasikan untuk mendapatkan pengaruh yang paling berbahaya terhadap struktur jembatan atau komponen-komponennya. Luasan yang tidak memberikan kontribusi dapat diabaikan dalam perencanaan.

Apabila suatu kendaraan sedang berada di atas jembatan, beban garis merata tambahan harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus :

$T_{EW} = 0{,}0012\ C_w\ (V_w)^2\ A_b$

Dimana :

$V_w = 2{,}5 * V_o * (\frac{V_{10}}{V_B}) \ln(\frac{Z}{Z_o})$

$V_{10} = V_B$ = 90 – 126 Km/jam.

Z = elevasi struktur dari permukaan tanah = 12000 mm.

Tabel 2.8 - Nilai V_0 dan Z_0 untuk berbagai variasi kondisi permukaan hulu

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
V_0 (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Z_0 (mm)	70	1000	2500

Tabel 2.9 - Koefisien seret (C_w)

Tipe Jembatan	C_w
Bangunan atas masif	
b/d = 1.0	2.1
b/d = 2.0	1.5
b/d = 6.0	1.25
Bangunan atas Rangka	1.2

b. Pengaruh gempa

Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa. Penggantian secara parsial atau lengkap pada struktur diperlukan untuk beberapa kasus. Kinerja yang lebih tinggi seperti kinerja operasional dapat ditetapkan oleh pihak yang berwenang.

Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (*Csm*) dengan berat struktur ekivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi *respons* (*Rd*) dengan formulasi sebagai berikut :

$$Eq = \frac{Csm}{Rd} x\ Wt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.16)$$

Keterangan:

Eq = Gaya gempa horizontal statis

Csm = Koefisien respons gempa elastis wilayah gempa

Rd = Faktor modifikasi *respons*

Wt = Berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai

Tabel 2.10 - Faktor modifikasi respon (R_d) untuk kolom dan hubungan dengan bangunan bawah (SNI 2833 : 2008)

	Kolom atau pilar	**Penghubung *(connection)* bangunan atas pada**		
		Kepala jembatan *(b)*	**Kolom, pilar atau tiang *(c)***	**Sambungan dilatasi**
Pilar tipe dinding *(a)*	2 (sumbu kuat) 3 (sumbu lemah)	0,8	1,0	0,8
Kolom tunggal	3-4			
Kolom majemuk	5-6			
pile cap beton	2-3			

Catatan:

a. Pilar tipe dinding dapat direncanakan sebagai kolom tunggal dalam arah sumbu lemah pilar
b. Untuk jembatan bentang tunggal digunakan faktor R_d = 2,5 untuk hubungan pada kepala jembatan
c. Sebagai alternatif hubungan kolom dapat direncanakan untuk gaya maksimum yang dikembangkan oleh sendi plastis kolom

Koefisien respons elastik *Csm* diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana. Koefisien percepatan yang diperoleh berdasarkan peta gempa dikalikan dengan suatu faktor amplifikasi sesuai dengan keadaan tanah sampai kedalaman 30 m di bawah struktur jembatan.

2.2.5.3 Beban Akibat Aksi Lalu Lintas (SNI 1725 : 2016)

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.

Beban truk "T" adalah satu kendaraan berat dengan 3 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap gandar terdiri atas dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk "T" diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

a. Beban lajur “D” (TD)

Beban lajur "D" terdiri atas beban terbagi rata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT) seperti terlihat dalam Gambar 2.5. Adapun faktor beban yang digunakan untuk beban lajur "D" seperti pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 - Faktor beban untuk beban lajur “D*”. (SNI 1725 : 2016)*

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

b. Intensitas beban “D”

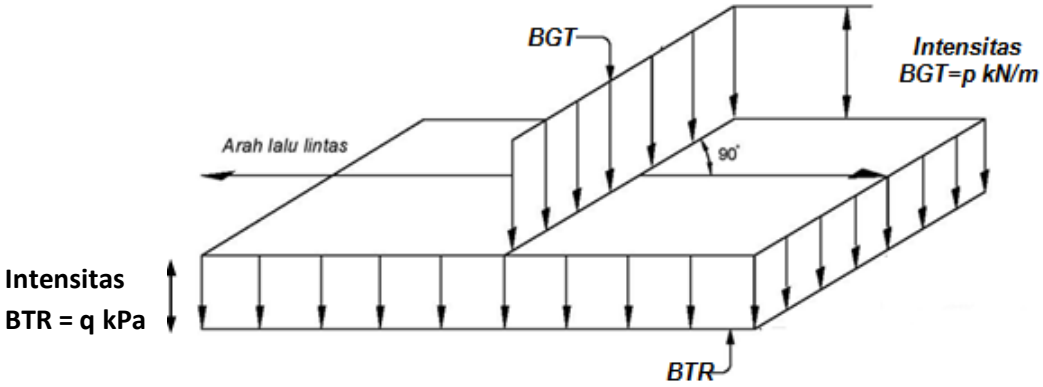
Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas *q* kPa dengan besaran *q* tergantung pada panjang total yang dibebani *L* yaitu seperti berikut :

- Jika $L \leq 30$ m : $q = 9{,}0$ kPa
- Jika $L > 30$m : $q = 9{,}0\left(0.5 + \frac{15}{L}\right)$ kPa

Keterangan:

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

L = panjang total jembatan yang dibebani (meter)

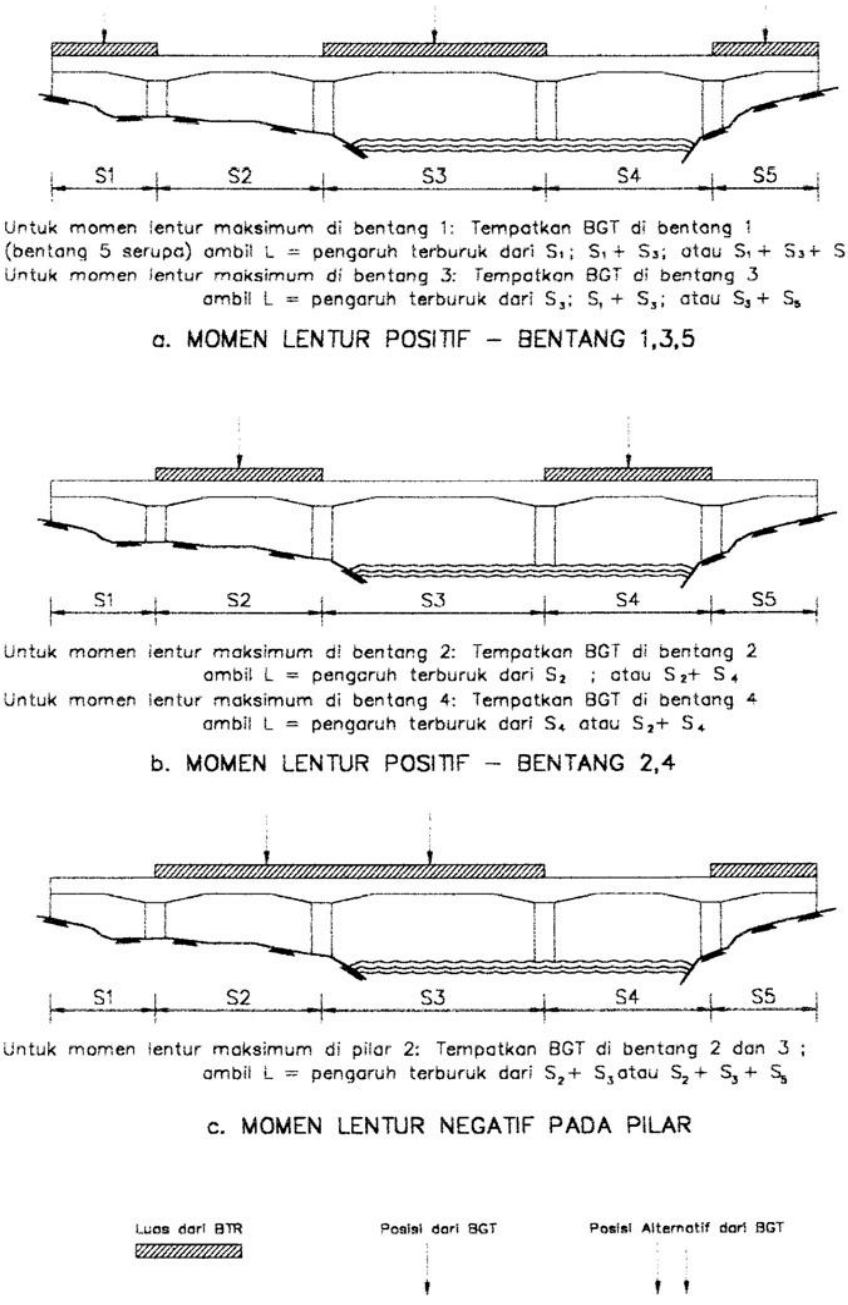


Gambar 2.5 - Intensitas beban “D”
(SNI 1725 : 2016)

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. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam ara melintang jembatan pada bentang lainnya.

c. Distribusi beban "D"

Beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen-komponen BTR dan BGT dari beban "D" secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.5. Kemudian untuk alternatif penempatan dalam arah memanjang dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 - Alternatif penempatan beban “D” dalam arah memanjang

(SNI 1725 : 2016)

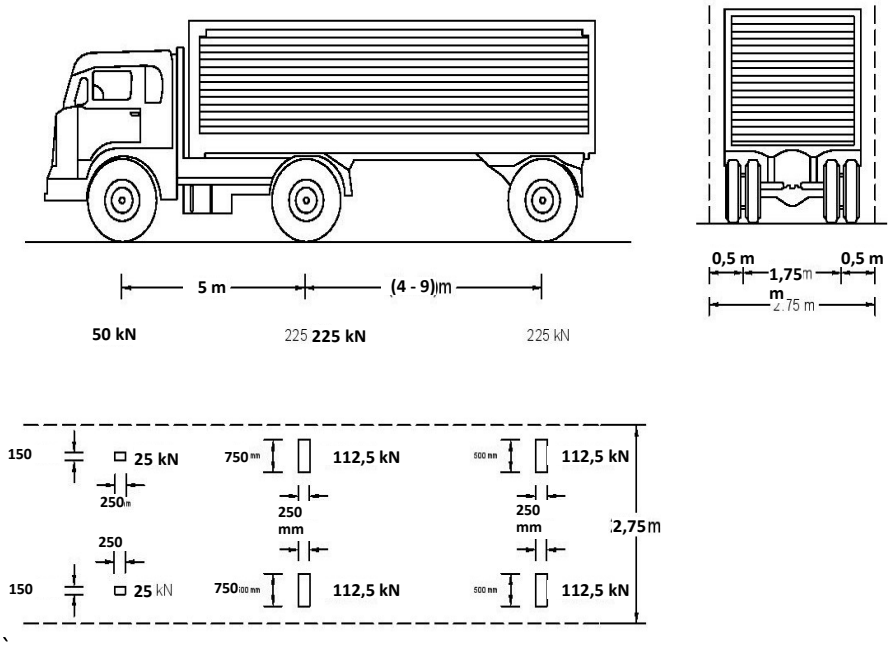
d. Beban truk "T" (TT)

Selain beban “D”, terdapat beban lalu lintas lainnya yaitu beban truk "T". Beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai. Adapun faktor beban untuk beban “T” seperti terlihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 - Faktor beban untuk beban “T”. *(SNI 1725 : 2016)*

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^{S})	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TT}^{U})
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

e. Besarnya pembebanan truk “T”



Gambar 2.7 - Pembebanan truk “T” (500 kN)
(SNI 1725 : 2016)

Pembebanan truk "T" terdiri atas kendaraan truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan dan berat gandar seperti terlihat dalam Gambar 2.7. Berat dari tiap-tiap gandar disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.

f. Gaya Rem

Pengaruh pengereman dari lalu lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang. Besarnya gaya rem arah memanjang jembatan tergantung panjang total jembatan (L) sebagai berikut :

Gaya rem, TTB = 250 kN	untuk L ≤ 80 m
Gaya rem, TTB = 250 + 2,5*(L – 80) kN	untuk 80 m < L< 180 m
Gaya rem, TTB = 500 kN	untuk L ≥ 180 m

Gaya rem dapat pula diambil dari :

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

2.2.6 Metode Pelaksanaan

Secara umum metode pelaksanaan jembatan beton dibedakan menjadi C*ast in situ segmental* dan *Precast segmental*. *Cast in situ segmental* merupakan metode pelaksanaan Jembatan dimana dilakukan pengecoran di lokasi pembangunan sedangkan *Precast segmental* merupakan metode pelaksanaan dimana beton disuplai dari luar berupa *precast* yang siap untuk dilakukan instalasi.

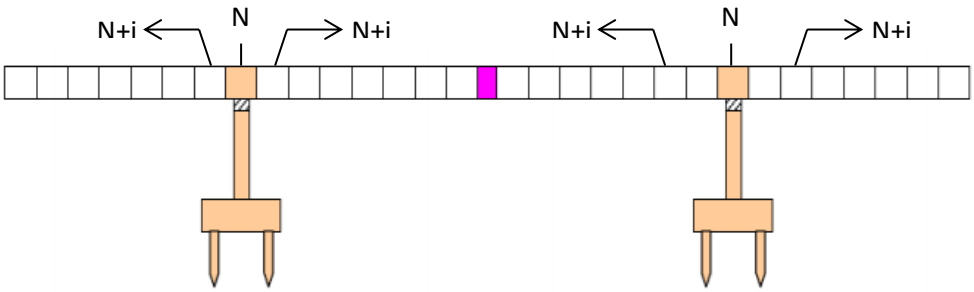
- Metode Cast insitu terdiri dari :
  a. *MSS (Movable Scaffolding System)*
  b. *ILM (Increamental Launching Method)*
  c. *Balanced Cantilever* dengan *FormTraveller*
  d. *Cable Stayed* dengan *Form*
- Metode *Precast Segmental* terdiri dari :
  a. *Balanced Cantilever Erection With Launching Gantry*
  b. *Balanced Cantilever Erection With Lifting Frames*
  c. *Span by Span Erection With Launching Gantry*
  d. *Balanced Cantilever Erection With Cranes*

2.2.6.1 Sistem Kantilever

Metode konstruksi *balanced cantilever* adalah metode pembangunan jembatan dimana dengan memanfaatkan efek kantilever seimbangnya maka struktur dapat berdiri sendiri, mendukung berat sendirinya tanpa bantuan sokongan lain (perancah). Metode ini dilakukan dari atas struktur sehingga tidak

diperlukan sokongan di bawahnya yang mungkin dapat mengganggu aktivitas di bawah jembatan.

Metode *balanced cantilever* dapat dilakukan dengan cor di tempat (*cast in situ*) atau secara segmen pracetak (*precast segmental*). Konsep utamanya adalah struktur jembatan dibangun dengan pertama kali membangun struktur-struktur kantilever seimbang. Kantilever yang pertama dibuat adalah kantilever ”N”, dan seterusnya dibangun kantilever ”N+1”, kantilever ”N+2”, kantilever ”N+3” dan kantilever ”N+i”.



Gambar 2.8 - Metode *balance cantilever*

(nusantarabajaprima.com/metode-balanced-cantilever)

2.2.6.2 *Movable Scaffolding System (MSS)*

MSS (Movable Scaffolding System) adalah suatu metode yang digunakan pada pelaksanaan *cast in situ* dimana pengecoran dilakukan di lokasi setelah selesainya bekisting. Prinsipnya adalah memindahkan *scaffolding* dengan cara digeser ke segmen berikutnya setelah beton mengeras.

Gambar 2.9 - *Movable Scaffolding System (MSS)*

(www.masterbuilder.co.in)

2.2.6.3 *ILM (Increamental Launching Method)*

ILM adalah suatu metode *erection* pada jembatan bentang panjang yang sudah diimplementasikan sejak tahun 1962 yaitu di *Rio Caroni Bridge*, Venezuela. Metode jembatan ini dibangun biasanya karena adanya syarat bahwa tidak diperbolehkan adanya gangguan pada sisi bawah lantai jembatan. Metode ini mengharuskan tersedianya lahan yang cukup luas di lokasi belakang *abutment* untuk produksi *segment* lantai jembatan.

Gambar 2.10 - *ILM (Increamental Launching Method)*

(http://www.tcpl.com)

2.2.6.4 Metode *balance cantilever* dengan *form traveler*

Form traveler adalah alat konstruksi yang digunakan pada pembangunan jembatan dengan *cast in situ*. Fungsi utama *form traveler* adalah sebagai bekisting berjalan sehingga pengecoran beton struktur dek jembatan dapat dilakukan dengan *segmental* pada lokasi dimana pemasangan *shoring* tidak memungkinkan seperti di atas sungai atau laut dan di atas lembah.

Jembatan *cable-stayed* dan *balanced cantilever* di Indonesia hampir semuanya menggunakan *form traveler* . Aplikasi *form traveler* menjadi topik yang menarik karena menawarkan alternatif metode konstruksi yang efisien untuk *cast in situ*.

Gambar 2.11 - *Form traveler box girder*

(www.cteg.com/)

Gambar 2.12 - *Form traveler cable stayed*
(www.nrsas.com/company/index.php)

2.2.6.5 Metode *balance cantilever* dengan *launching gantry*

Metode ini digunakan untuk balok yang adalah hasil *precast* dan bukan hasil pengecoran *in situ*. Pada metode ini digunakan satu buah *gantry* atau lebih yang digunakan sebagai peluncur segmen-segmen *box girder* yang ada.

Gambar 2.13 - *Gantry launcher*

(www.launching-gantry-operator.com)

2.2.6.6 Metode *balance cantilever* dengan rangka pengangkat (*lifting frame*)

Pada dasarnya metode ini hampir sama dengan metode *launching gantry*. Perbedaaannya cuma pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen-segmen jembatannya.

Gambar 2.14 – *Lifting frame*

(somerseteng.com/project-gallery)

2.2.6.7 Metode *balance cantilever* dengan *crane*

Pada dasarnya metode ini hampir sama dengan metode *lifting frame*. Perbedaaannya cuma pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen-segmen jembatannya. Pada sistem ini digunakan *crane* untuk mengangkat tiap segmen. Sedangkan pada *lifting frame* digunagan metode *lifting* untuk mengangkat tiap segmennya.

Gambar 2.15 – *Balanced cantilever* dengan *crane*

(www.launching-gantry-operator.com)

Pada penelitian ini metode pelaksanaan yang digunakan adalah metode *balanced cantilever* dengan *form traveler* sebagai gelagar untuk *beton cast in situ* pada *box girder*.

2.2.6.7 Metode *Erection PCI Girder* dengan Semi *Launcher*

Metode ini digunakan untuk *PCI girder* dengan ukuran yang besar dengan kata lain dimensi struktur yang lebih besar dari *PCI girder* pada umumnya, selain itu penggunaan semi *launcher* atau *truss* ini dengan mempertimbangkan medan yang dihadapi di lapangan, apakah itu berupa sungai, ataupun bentang antar *station* yang panjang. Sistem kerja untuk semi *launcher* atau *truss* ini mirip dengan *lifting frame*, dimana untuk menaikkan girder harus diikat dan ditarik menggunakan *strand jack* yang dipasang pada *truss* sebagai *launcher* nya.

Gambar 2.16 - *Erection PCI Girder* dengan Semi *Launcher*

(*Proyek Jalan Tol Becakayu*)