

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Jembatan

Jembatan adalah suatu konstruksi yang gunanya untuk meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang lebih rendah. Rintangan ini biasanya jalan lain berupa jalan air atau jalan lalu lintas biasa, lembah yang dalam, alur sungai saluran irigasi dan pembuang (Veen, 1990).

B. Pembebanan Jembatan

1. Beban Mati

Beban mati adalah semua beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan atau bagian jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsur tambahan yang dianggap merupakan satu kesatuan tetap dengannya (RSNI T-02-2005). Dalam menentukan besarnya beban mati tersebut, harus digunakan nilai berat isi untuk bahan – bahan bangunan tersebut pada **Tabel 2.1** dibawah ini:

Tabel 2.1. Berat isi bahan – bahan bangunan

No.	Bahan	Berat/Satuan Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (kg/m ³)
1	Campuran Aluminium	26,7	2720
2	Lapisan permukaan beraspal	22	2240
3	Besi Tuang	71	7200
4	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1760
5	Kerikil dipadatkan	18,8 - 22,7	1920 – 2320
6	Aspal beton	22	2240
7	Beton ringan	12,25 - 19,6	1250 – 2000
8	Beton	22 - 25	2240 – 2560
9	Beton prategang	25 - 26	2560 – 2640
10	Beton bertulang	23,5 - 25,5	2400 – 2600
11	Timbal	111	11400
12	Lempung lepas	12,5	1280
13	Batu pasangan	23,5	2400
14	Neoprin	11,3	1150
15	Pasir kering	15,7 - 17,2	1600 – 1760
16	Pasir basah	18 - 18,8	1840 – 1920
17	Pasir Lunak	17,2	1760
18	Baja	77	7850
19	Kayu (ringan)	7,8	800
20	Kayu (keras)	11	1120
21	Air murni	9,8	1000
22	Air garam	10	1025
23	Besi tempa	75,5	7680

2. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan seluruh beban hidup, arah vertikal dan horisontal, akibat aksi kendaraan pada jembatan termasuk hubungannya dengan pengaruh dinamis, tetapi tidak termasuk akibat tumbukan. Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur "D" dan beban truk "T" (RSNI T-02-2005).

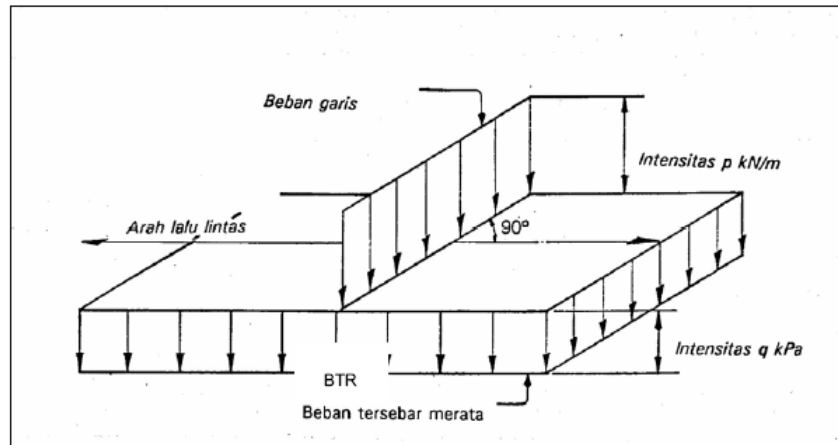
Beban lajur "D" bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring- iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur "D" yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri.

Beban "D" didasarkan pada karakteristik jembatan yang memiliki lajur lalu lintas rencana dimana jumlah maksimum lajur lalu lintas untuk berbagai lebar lalu lintas ditentukan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2. Jumlah jalur lalu lintas

Tipe Jembatan (1)	Lebar Jalur Kendaraan (m) (2)	Jumlah Lajur Lalu lintas Rencana (n _i)
Satu lajur	4,0 - 5,0	1
Dua arah, tanpa median	5,5 - 8,25 11,3 - 15,0	2 (3) 4
Banyak arah	8,25 - 11,25 11,3 - 15,0 15,1 - 18,75 18,8 - 22,5	3 4 5 6
CATATAN (1) Untuk jembatan tipe lain, jumlah lajur lalu lintas rencana harus ditentukan oleh Instansi yang berwenang. CATATAN (2) Lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak antara kerb/rintangan/median dengan median untuk banyak arah. CATATAN (3) Lebar minimum yang aman untuk dua-lajur kendaraan adalah 6,0 m. Lebar jembatan antara 5,0 m sampai 6,0 m harus dihindari oleh karena hal ini akan memberikan kesan kepada pengemudi seolah-olah memungkinkan untuk menyiap.		

Intensitas beban lajur “D” terdiri dari beban tersebar merata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT) seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2.1. Intensitas beban lajur “D”

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

- a) Bila $L \leq 30$ m; $q = 9$ kPa
- b) Bila $L > 30$ m; $q = 9 (0,5 + (15/L))$ kPa

dengan pengertian:

q adalah intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan; L adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter).

Panjang yang dibebani L adalah panjang total BTR yang bekerja pada jembatan. BTR harus dipecah menjadi panjang-panjang tertentu untuk mendapatkan pengaruh maksimum pada jembatan menerus atau bangunan khusus. Beban garis (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 arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

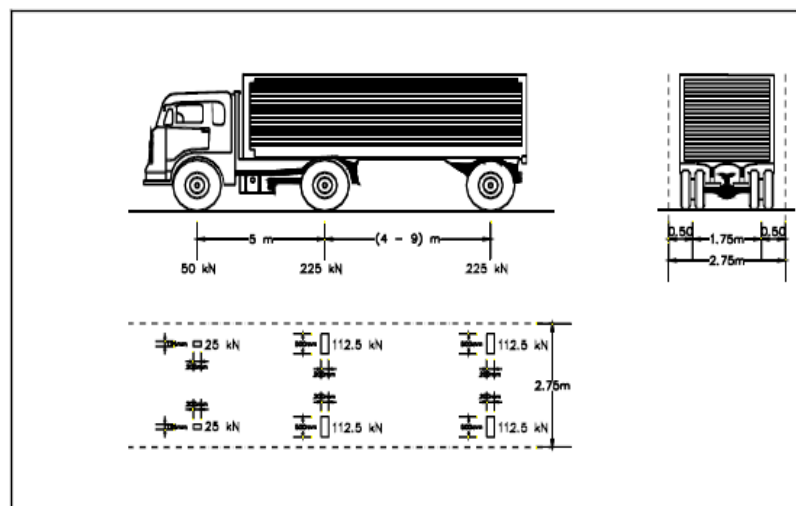
Penyebaran beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen-komponen BTR dan BGT dari beban "D" pada arah melintang harus sama. Penempatan beban ini dilakukan dengan ketentuan adalah sebagai berikut :

- a. Bila lebar jalur kendaraan jembatan kurang atau sama dengan 5,5 m, maka beban "D" harus ditempatkan pada seluruh jalur dengan intensitas 100 % .
- b. Apabila lebar jalur lebih besar dari 5,5 m, beban "D" harus ditempatkan pada jumlah lajur lalu lintas rencana (nl) yang berdekatan, dengan intensitas 100 %. Hasilnya adalah beban garis ekuivalen sebesar $nl \times 2,75 q$ kN/m dan beban terpusat ekuivalen sebesar $nl \times 2,75 p$ kN, kedua – duanya bekerja berupa *strip* pada jalur selebar $nl \times 2,75$ m;
- c. Lajur lalu lintas rencana yang membentuk strip ini bisa ditempatkan dimana saja pada jalur jembatan. Beban "D" tambahan harus ditempatkan pada seluruh lebar sisa dari jalur dengan intensitas sebesar 50 %.

Beban truk "T" adalah satu kendaraan berat dengan 3 as yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap as terdiri dari dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai

simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Ketentuan satu truk "T" diterapkan per lajur lalu lintas rencana seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2.**

Berat dari masing – masing as disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 as tersebut bisa diubah-ubah antara 4,0 m sampai 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 2.2. Ketentuan beban "T" pada jembatan jalan raya

3. Gaya Rem

Pengaruh gaya – gaya dalam arah memanjang jembatan akibat gaya rem, harus ditinjau. Pengaruh ini diperhitungkan senilai dengan pengaruh gaya rem sebesar 5% dari beban "D" tanpa koefisien kejut yang memenuhi semua jalur lalu lintas yang ada dan dalam satu jurusan.

Gaya rem tersebut dianggap berkerja horizontal dalam arah sumbu jembatan dengan titik tangkap setinggi 1,80 meter di atas permukaan lantai kendaraan (Supriyadi, dkk., 2007).

4. Beban Angin

Angin harus dianggap bekerja secara merata pada seluruh bangunan atas. Apabila suatu kendaraan sedang ada diatas jembatan, beban garis merata tambahan arah horizontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus :

$$Tew = 0,0012 \times C_w \times V_w^2 \text{ (kN/m)} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan :

Tew = beban garis akibat beban angin (kN/m)

C_w = koefisien seret

V_w = kecepatan rencana angin (m/s)

Untuk koefisien seret dan kecepatan rencana angin dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 2.3. Koefisien seret

Tipe Jembatan	C_w
Bangunan atas masif: (1), (2)	
$b/d = 1.0$	2.1 (3)
$b/d = 2.0$	1.5 (3)
$b/d \geq 6.0$	1.25 (3)
Bangunan atas rangka	1.2
CATATAN (1) b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi bagian sandaran yang masif CATATAN (2) Untuk harga antara dari b / d bisa diinterpolasi linier CATATAN (3) Apabila bangunan atas mempunyai superelevasi, C_w harus dinaikkan sebesar 3 % untuk setiap derajat superelevasi, dengan kenaikan maksimum 2,5 %	

Tabel 2.4. Kecepatan rencana angin

Keadaan Batas	Lokasi	
	Sampai 5 km dari pantai	> 5 km dari pantai
Daya layan	30 m/s	25 m/s
Ultimit	35 m/s	30 m/s

5. Beban Akibat Gempa Bumi

Pengaruh-pengaruh gempa bumi pada jembatan dihitung senilai dengan pengaruh suatu gaya horizontal pada konstruksi yang ditinjau dan perlu ditinjau pula gaya – gaya lain yang berpengaruh seperti gaya gesek pada perletakan, tekanan hidro – dinamik akibat gempa, tekanan tanah akibat gempa dan gaya angkat apabila pondasi yang direncanakan merupakan pondasi terapung/pondasi langsung (Supriyadi, dkk., 2007).

6. Beban terfaktor

Beban kerja yang merupakan yang telah dikalikan dengan factor beban yang sesuai. (Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan)

C. Stressing (Pemberian Gaya Prategang)

Secara bahasa *stressing* berarti tekanan. Secara istilah *stressing* merupakan proses yang dilakukan untuk menyambungkan *girder* yang terdiri dari beberapa bagian/ segmen, menjadi satu kesatuan. Selain itu juga, inti dari proses *stressing* adalah memberikan gaya prategang pada balok, sehingga balok sudah memiliki tegangan sebelum mendapatkan beban. Pada literatur

lain juga dikatakan, *stressing* merupakan proses penarikan kabel tendon yang ada di dalam girder untuk menjadikan girder sebagai beton prategang.

D. Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SNI 03-2847-2002).

Beton memiliki sifat utama yaitu kuat terhadap beban tekan, maka untuk mengetahui mutu beton, pada umumnya ditinjau terhadap kuat beton tersebut.

E. Girder

Girder merupakan balok yang terpasang pada jembatan. Balok yang digunakan pada pembangunan jembatan dibangun sesuai kebutuhan jembatan itu sendiri. Untuk jembatan yang memiliki panjang bentang maksimal 25 m, biasanya hanya menggunakan balok bertulang biasa. Namun apabila panjang bentang sudah melebihi dari 25 m, jembatan tersebut harus menggunakan balok prategang atau balok prestress. Pada girder atau balok prestress itu ada beberapa bahan yang terpasang di dalam dan di luar dari girder itu sendiri, bahan-bahan itu adalah sebagai berikut :

1. Strand

Strand merupakan kabel yang akan ditarik oleh *hydraulic jack* pada proses *stressing*. Pada proses *stressing*, yang lazim dipakai adalah *strand* dengan 7

kawat. *Strand* yang dipakai biasanya memiliki nominal diameter sebesar 12,7 mm dan luas penampang efektif sebesar 100 mm². Kuat tarik ultimate dari *strands* jenis ini sebesar 1840 MPa dan tegangan putus sebesar 184 kN.

2. Anchor Head (Angker Hidup)

Bagian dari angker yang berfungsi untuk mengikat atau mengunci baja strands setelah dilakukan stressing. Ukuran angker hidup ini bervariasi sesuai dengan gaya yang ditahan, ukuran dan mutu baja strands yang digunakan. Kombinasi lubang angker yaitu 7 dan 12 dengan ukuran 0.5'' dan 0.6''. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

3. *Wedges*

Terdiri dari sepasang baji yang bentuknya hampir menyerupai seperti bentuk kerucut dan bagian dalamnya bergerigi. Berfungsi sebagai penjepit kabel *strand* yang sudah terlebih dahulu terpasang pada *wedges plate*, agar kabel *strand* tidak mengalami pergerakan saat dilaksanakan *stressing*. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

4. Casting

Bagian dari angker yang tertanam dalam beton. Permukaan luar casting berfungsi untuk meneruskan gaya prategang kedalam beton. Sama halnya dengan angker hidup, ukuran casting ini sesuai dengan besar gaya yang ditahan. Pasangan anchor head dan casting biasa dikenal dengan sebutan angker hidup. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

5. Bursting Steel

Berupa rangkaian tulangan besi dipasang dan tertanam di belakang casting. Berfungsi sebagai perkuatan untuk menahan penyebaran gaya arah radial yang terjadi akibat gaya prategang yang bekerja pada casting. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

6. Duct/ Sheat (Kelongsong)

Berbentuk seperti pipa, berfungsi sebagai tempat kedudukan baja prestress sehingga posisi sesuai dengan yang direncanakan setelah beton dicor, juga untuk menjaga baja prestress agar bebas dari ikatan dengan beton. Diameter duct yang biasa digunakan 51, 66, 84, dan 105 mm. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

7. Grout Vent

Pipa untuk lubang memasukkan bahan grout atau dapat juga sebagai lubang ventilasi pada saat pekerjaan grouting dilakukan. Biasanya dipasang pada posisi tertinggi dan terendah. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

8. Dead End (Angkur Mati)

Berbeda dengan pasangan anchor head dan casting, bagian ini hanya berfungsi untuk menahan gaya stressing dan bukan sebagai pengunci. Ada beberapa jenis angkur mati dan penggunaannya disesuaikan dengan keadaan dan posisi struktur yang ada. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

9. Diafragma

Diafragma adalah balok yang berada diantara dua girder yang berfungsi sebagai pengikat antar girder dan penyebaran beban hidup. Tebal diafragma untuk semua bentang adalah 200 mm. Pada diafragma ini dapat dipilih dengan menggunakan kabel atau tulangan saja yang detailnya bias dilihat dalam gambar kerja. (Standar Bangunan Atas Jembatan, Dirjen Bina Marga)

F. Kuat tekan beton

Kuat tekan beton yang ditetapkan oleh perencana struktur (benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm), untuk dipakai dalam perencanaan struktur beton, dinyatakan dalam satuan mpa. Bila nilai f'_c di dalam tanda akar, maka hanya nilai numerik dalam tanda akar saja yang dipakai, dan hasilnya tetap mempunyai satuan MPa (SNI-03-2847-2002).

Nilai f'_c bisa didapat dengan rumus sebagai berikut :

$$f'_c = 0,83 \times K/10 \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan:

f'_c = Kuat tekan beton sampel silinder (MPa)

K = Mutu beton sampel kubus (kg/cm^2)

G. Modulus Elastik Beton (E_c)

Rasio tegangan normal tarik atau tekan terhadap regangan yang timbul akibat tegangan tersebut. Nilai rasio ini berlaku untuk tegangan di bawah batas proporsional material (SNI-03-2847-2002).

Nilai modulus elastisitas bisa didapat dengan rumus sebagai berikut :

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan:

E_c = Modulus elastik beton (MPa)

f'_c = Kuat tekan beton sampel silinder (MPa)

H. Nilai perbandingan modulus elastik plat dan balok

$$n = E_c \text{ pelat} / E_c \text{ balok prategang} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan:

E_c pelat = modulus elastik pelat (MPa)

E_c balok prategang = modulus elastik balok prategang (MPa)

I. Tegangan izin

1. Kuat Tekan Beton pada keadaan awal (saat transfer) (f_{ci}') :

$$f_{ci}' = 0.80 \times f'_c \dots\dots\dots (2.5)$$

2. Tegangan ijin beton saat penarikan :

$$\text{Tegangan ijin tekan} = 0,6 \times f_{ci}' \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{Tegangan ijin tarik} = 0,5 \times \sqrt{f_{ci}'} \dots\dots\dots (2.7)$$

3. Tegangan ijin beton pada keadaan akhir :

$$\text{Tegangan ijin tekan} = 0,45 \times f'_c \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\text{Tegangan ijin tarik} = 0,5 \times \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan :

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

f_{ci} = kuat tekan beton saat transfer (MPa)

(Sumber : SNI-03-2847-2002)

J. Penentuan lebar efektif pelat (be)

Nilai lebar efektif didapat dari rumus- rumus berikut ini :

$$be = \frac{L}{4} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$be = S \dots\dots\dots (2.11)$$

$$be = 12 \times h_o \dots\dots\dots (2.12)$$

Setelah didapat nilai dari masing- masing persamaan, nilai lebar efektif diambil dari nilai yang terkecil.

dengan :

be = lebar efektif pelat (m)

L = panjang bentang balok (m)

S = jarak antar girder (m)

h_o = tebal pelat (m)

K. Modulus elastik balok beton prategang (E_c balok prategang)

Nilai modulus elastic untuk balok beton prategang bias didapat dari rumus sebagai berikut :

$$E_c = 0.043 \times w_c^{1.5} \times \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan :

E_c = modulus elastik beton prategang (MPa)

w_c = berat volume bahan beton prategang (kN/m^3)

f'_c = kuat tekan beton (Mpa)

(Sumber : SNI-03-2847-2002)

L. Modulus Geser

$$G = \frac{E_c}{2 \times (1+\nu)} \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan :

G = modulus geser (MPa)

E_c = modulus elastik beton (MPa)

ν = angka poisson

M. Section properties

1. Letak titik berat :

$$y_b = \sum A \times y / \sum A \dots\dots\dots (2.15)$$

$$y_a = h - y_b \dots\dots\dots (2.16)$$

2. Momen inersia terhadap alas balok (I_b) :

$$I_b = \sum A \times y^2 + \sum I_{xo} \dots\dots\dots (2.17)$$

3. Momen inersia terhadap titik berat balok (I_x) :

$$I_x = I_b - A \times y_b^2 \dots\dots\dots (2.18)$$

4. Tahanan momen (W)

Tahanan momen sisi atas (W_a) :

$$W_a = I_x / y_a \dots\dots\dots (2.19)$$

Tahanan momen sisi bawah (W_b) :

$$W_b = I_x / y_b \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan:

y_a = jarak dari titik berat balok ke serat teratas balok (m)

y_b = jarak dari titik berat balok ke serat terbawah balok (m)

h = tinggi balok (m)

I_b = momen inersia terhadap alas balok (m⁴)

I_{xo} = momen inersia penampang (m⁴)

I_x = momen inersia terhadap titik berat balok (m⁴)

W_a, W_b = tahanan momen (m³)

A = luas penampang balok (m²)

N. Perhitungan pembebanan

Berat balok (Q):

$$W = A \times L \times w_c \dots\dots\dots (2.21)$$

$$Q = W / L \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan :

W = berat balok (kN)

A = luas peampang balok (m²)

L = panjang balok (m)

w_c = berat volume beton (kN/m³)

Q = berat balok permeter panjang (kN/m)

O. Eksentrisitas tendon (es)

Nilai eksentrisitas bisa didapat dari rumus sebagai berikut :

$$es = y_b - z_o \dots\dots\dots (2.23)$$

dengan :

es = eksentrisitas tendon (m)

y_b = jarak titik berat ke sisi bawah balok (m)

z_o = jarak dari alas ke lintasan inti tendon pada tengah bentang 0,1375 (m)

P. Gaya Momen dan Gaya Geser

$$M = 1/8 \times Q \times L \dots\dots\dots (2.24)$$

$$V = 1/2 \times Q \times L \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan :

M = Gaya momen (kNm)

V = Gaya geser (kN)

Q = berat benda permeter panjang (kN/m)

L = panjang balok (m)

Q. Gaya prategang

1. Gaya prategang awal (P_t)

$$P_t = M_{\text{balok}} / (e_s - W_a/A) \dots\dots\dots (2.26)$$

$$P_t = (0.6 \times f_{ci}' \times W_b + M_{\text{balok}}) / (W_b / A + e_s) \dots\dots\dots (2.27)$$

Dari dua persamaan diatas diambil nilai yang terkecil untuk menentukan nilai gaya prategang awal yang dipakai.

dengan :

P_t = Gaya prategang awal (kN)

M_{balok} = Momen maksimum akibat beban balok (kNm)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

W_a, W_b = tahanan momen (m^3)

A = luas penampang balok (m^2)

2. Gaya prategang saat jacking (P_j)

Untuk gaya prategang saat jacking, secara umum nilainya bisa kita dapatkan dari urutan rumus-rumus berikut ini :

$$P_j = P_t / 0,85 \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P_j = 0,8 \times P_{b1} \times n_t \dots\dots\dots (2.29)$$

Kemudian dari persamaan kedua rumus diatas didapat jumlah tendon dan jumlah strand:

$$n_t = P_t / (0,85 \times 0,8 \times P_{b1}) \dots\dots\dots (2.30)$$

$$n_s = P_t / (0,85 \times 0,8 \times P_{bs}) \dots\dots\dots (2.31)$$

Persentase tegangan leleh:

$$p_o = P_t / (0,85 \times n_s \times P_{bs}) \times 100\% \dots\dots\dots (2.32)$$

Gaya prategang yang terjadi akibat jacking:

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs} \dots\dots\dots (2.33)$$

dengan :

P_t = gaya prategang awal (kN)

P_j = gaya prategang saat jacking (kN)

p_o = persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (%)

n_t = jumlah tendon

n_s = jumlah strand

P_{bs} = beban putus minimal satu strand (kN)

P_{b1} = beban putus satu tendon (kN)

R. Penulangan Balok

$$A_s = \pi/4 \times D^2 \dots\dots\dots (2.34)$$

$$A_s \text{ total} = 0,5 \% \times A \dots\dots\dots (2.35)$$

$$\text{Jumlah tulangan} = \frac{A_s \text{ total}}{A_s} \dots\dots\dots (2.36)$$

dengan :

A_s = luas penampang satu tulangan (m^2)

$A_s \text{ total}$ = luas tulangan total yang dibutuhkan (m^2)

S. Perhitungan posisi tendon

1. Posisi tendon di tengah bentang

Jarak vertikal antara as ke as tendon:

$$Y_d = n_s \text{ total} \times (z_o - a) / n_s \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan :

y_d = jarak vertikal antara as ke as tendon (m)

$n_s \text{ total}$ = jumlah strand seluruh

z_o = jarak dari alas ke lintasan inti tendon pada tengah bentang (m)

a = jarak dari alas balok ke as baris tendon ke 1 pada bagian tengah bentang balok (m)

2. Posisi tendon di tumpuan

$$y_e / y_d' = (\sum n_i \times y_d') / n_s \dots\dots\dots (2.38)$$

$$y_e = y_b - a' \dots\dots\dots (2.39)$$

$$y_{d'} = y_e / (y_e / y_{d'}) \dots\dots\dots (2.40)$$

$$z_o = a' + y_e = y_b \dots\dots\dots (2.41)$$

dengan :

y_e = letak titik berat girder terhadap pusat tendon terbawah (m)

y_b = jarak dari titik berat balok ke serat atas terbawah balok (m)

$y_{d'}$ = jarak as ke as tendon pada bagian tumpuan (m)

n_s = jumlah kawat untai strand yang diperlukan (m)

a' = jarak dari alas balok ke baris tendon ke 4 pada bagian tumpuan (m)

z_o = jarak dari alas ke lintasan inti tendon pada tengah bentang (m)

3. Eksentrisitas masing-masing tendon

$$z_i = a' + y_{d'} \dots\dots\dots (2.42)$$

dengan :

z_i = jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tengah bentang (m)

a' = jarak dari alas balok ke baris tendon ke 4 pada bagian tumpuan (m)

$y_{d'}$ = jarak as ke as tendon pada bagian tumpuan (m)

Perhitungan nilai x_i :

$$x_i = z_i' - z_i \dots\dots\dots (2.43)$$

dengan :

x_i = selisih antara jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tumpuan dan bagian tengah bentang (m)

z_i' = jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tumpuan (m)

z_i = jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tengah bentang (m)

4. Lintasan inti tendon

$$Y = 4 \times e_s \times X / L^2 \times (L - X) \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan :

Y = lintasan inti tendon (m)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

X = jarak dari tumpuan menuju ketengah bentang (m)

L = panjang balok (m)

Sudut lintasan inti tendon :

$$L/2 + x_o \dots\dots\dots (2.45)$$

$$e_s + e_o \dots\dots\dots (2.46)$$

$$\theta = \frac{2 \times (e_s + e_o)}{\frac{L}{2} + x_o} \dots\dots\dots (2.47)$$

dengan :

L = panjang balok (m)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

e_o = jarak antara pusat angkur ke pusat titik berat balok (m)

x_o = jarak horizontal dari posisi angkur ke titik pertemuan antara titik berat balok dan lintasan inti tendon (m)

θ = sudut lintasan tendon dari ujung ke tengah

5. Sudut angkur masing-masing tendon

$$dY/dX = 4 \times x_i / L \dots\dots\dots (2.48)$$

$$\theta = \text{ATAN} (dY/dX) \dots\dots\dots (2.49)$$

dengan:

x_i = selisih antara jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tumpuan dan bagian tengah bentang (m)

L = panjang balok (m)

θ = sudut masing-masing angkur

6. Posisi masing masing tendon

$$z_i = z_i' - 4 \times x_i \times X / L^2 \times (L - X) \dots\dots\dots (2.50)$$

dengan :

z_i = jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tengah bentang (m)

z_i' = jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tumpuan (m)

x_i = selisih antara jarak alas ke as masing-masing tendon di setiap barisnya pada bagian tumpuan dan bagian tengah bentang (m)

X = jarak dari tumpuan menuju ketengah bentang (m)

L = panjang balok (m)

T. Loss of prestress (kehilangan gaya prategang)

Secara umum kehilangan gaya prategang pada balok terbagi menjadi dua, yaitu jangka pendek dan jangka panjang.

1. Loss of prestress jangka pendek

a. Akibat gesekan ankur (Anchorage Friction)

Dalam penelitian ini, kehilangan gaya akibat gesekan ankur diperhitungkan sebesar 3 % dari gaya prategang akibat jacking.

$$P_o = 97 \% \times P_j \dots\dots\dots (2.51)$$

dengan :

P_o = Gaya prategang akibat gesekan ankur (kN)

P_j = Gaya prategang saat jacking (kN)

b. Akibat gesekan kabel saat jacking (Jack Friction)

Loss of prestress akibat gesekan kabel saat jacking bisa didapat dari rumus berikut ini :

$$P_x = P_o \times e^{(-\mu \times (\theta + \beta \times L_x))} \dots\dots\dots (2.52)$$

dengan :

P_x = Gaya prategang akibat gesekan saat jacking (kN)

P_o = Gaya prategang akibat gesekan ankur (kN)

e = bilangan natural (2,7183)

μ = koefisien gesek (NAASRA Bridge Design Spesification)

θ = sudut lintasan tendon (rad)

β = koefisien wobble (NAASRA Bridge Design Spesification)

L_x = Panjang bentang balok (m)

c. Akibat Pemendekan Elastis (Elastic Shortening)

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

$$\Delta p_e = \Delta \sigma_{pe} \times A_t \dots\dots\dots (2.53)$$

dengan :

Δp_e = kehilangan tegangan akibat pemendekan elastic (kN)

$\Delta \sigma_{pe}$ = Kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri (kPa)

A_t = luas tampang tendon baja prategang (m^2)

d. Akibat pengangkuran (Anchoring)

Nilai akhir gaya prategang akibat pengangkuran bisa didapat dari

rumus berikut ini :

$$P_{\max} = P'_{\max} - \Delta p_e \dots\dots\dots (2.54)$$

dengan :

$P_{\max}$ = gaya prategang akibat pengangkuran (kN)

$P'_{\max}$ = nilai hitungan sebelumnya (kN)

Δp_e = kehilangan tegangan akibat pemendekan elastic (kN)

2. Loss of prestress jangka panjang

a. Pengaruh susut (Shrinkage)

Loss of prestress akibat pengaruh susut bisa didapat dengan rumus

sebagai berikut :

$$\sigma_{sh} = \Delta \epsilon_{su} \times E_s \dots\dots\dots (2.55)$$

dengan :

σ_{sh} = tegangan akibat susut (kPa)

$\Delta \epsilon_{su} = \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p$ (koefisien pengali)

E_s = Modulus elastis baja prategang (kPa)

b. Pengaruh rangkak (creep)

Loss of prestress akibat pengaruh rangkak bisa didapat dengan

rumus sebagai berikut :

$$\sigma_{pi} = P_i / A_t \dots\dots\dots (2.56)$$

dengan :

σ_{pi} = tegangan akibat rangkak (kPa)

P_i = P initial saat transfer (kN)

A_t = luas tampang tendon baja prategang (m^2)

U. Tegangan yang terjadi pada balok

1. Tegangan Yang Terjadi Pada Penampang Balok

a. Keadaan Awal (Saat Transfer)

Tegangan yang terjadi pada keadaan awal saat transfer bisa dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f_c = - P_t / A + P_t \times e_s / W - M_{\text{balok}} / W \dots\dots\dots (2.57)$$

dengan :

f_c = tegangan pada kondisi awal saat transfer (kPa)

P_t = prategang awal saat transfer (kN)

A = luas penampang balok (m^2)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

W = tahanan momen (m^3)

M_{balok} = momen maksimum akibat beban balok (kNm)

b. Keadaan Setelah Loss Of Prestress

Tegangan yang terjadi setelah loss of prestress dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f = - P_{\text{eff}} / A \pm P_{\text{eff}} \times e_s / W \pm M_{\text{balok}} / W \dots\dots\dots (2.58)$$

dengan :

f = tegangan setelah loss of prestress (kPa)

P_{eff} = prategang efektif (kN)

A = luas penampang balok (m^2)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

W = tahanan momen (m^3)

M_{balok} = momen maksimum akibat beban balok (kNm)

c. Keadaan Setelah Plat Lantai Selesai Dicor

Tegangan yang terjadi setelah plat lantai selesai dicor dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f = - P_{\text{eff}} / A \pm P_{\text{eff}} \times e_s / W \pm M_{\text{balok+plat}} / W \dots\dots\dots (2.59)$$

dengan :

f = tegangan setelah pelat lantai selesai dicor (kPa)

P_{eff} = prategang efektif (kN)

A = luas penampang balok (m^2)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

W = tahanan momen (m^3)

$M_{balok+pelat}$ = momen maksimum akibat beban balok dan beba pelat (kNm)

d. Keadaan Setelah Plat Dan Balok Menjadi Komposit

Tegangan yang terjadi setelah plat dan balok menjadi komposit

dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f = - P_{eff} / A_c \pm P_{eff} \times e_s / W_c \pm M_{balok+pelat} / W_c \dots\dots\dots (2.60)$$

dengan :

f = tegangan setelah pelat lantai selesai dicor (kPa)

P_{eff} = prategang efektif (kN)

A_c = luas penampang balok komposit (m^2)

e_s = eksentrisitas tendon (m)

W_c = tahanan momen komposit (m^3)

$M_{balok+pelat}$ = momen maksimum akibat beban balok dan beba pelat (kNm)

2. Tegangan Yang Terjadi Pada Balok Komposit

Tegangan akibat pembebanan pada balok secara umum dapat dihitung

dengan rumus sebagai berikut :

$$f = \pm M / W_c \dots\dots\dots (2.61)$$

dengan :

f = tegangan akibat pembebanan (kPa)

M = Momen akibat beban (kNm)

W_c = Tahanan momen pada penampang komposit (m^3)

3. Tegangan akibat susut dan rangkai beton

a. Tegangan Akibat Susut Beton (Shrinkage)

Tegangan akibat susut beton dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f_c = P_s / A_c - P_s \times e' / W_c \dots\dots\dots (2.62)$$

dengan :

f_c = tegangan akibat susut beton (kPa)

P_s = gaya internal yang timbul akibat susut (kN)

e' = eksentrisitas tendon (m)

A_c = luas penampang komposit (m²)

W_c = tahanan momen penampang komposit (m³)

b. Tegangan Akibat Rangkai Beton (Creep)

Tegangan sebelum loss of prestress :

$$f_a = - P_i / A_c \pm P_i \times e's / W_c \pm M_{balok+pelat} / W_c \dots\dots\dots (2.63)$$

Tegangan sebelum loss of prestress :

$$f_a = - P_{eff} / A_c \pm P_{eff} \times e's / W_c \pm M_{balok+pelat} / W_c \dots\dots\dots (2.64)$$

dengan :

f_a = tegangan akibat rangkai (kPa)

P_i = prategang initial (kN)

P_{eff} = prategang efektif (kN)

$e's$ = eksentrisitas (m)

A_c = luas penampang komposit (m²)

W_c = tahanan momen penampang komposit (m³)

4. Tegangan Akibat Prategang (PR)

Nilai tegangan akibat prategang dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f_c = -P_{eff} / A_c \pm P_{eff} \times e's / W_c \dots\dots\dots (2.65)$$

dengan :

f_c = tegangan akibat prategang (kPa)

P_{eff} = prategang efektif (kN)

$e's$ = eksentrisitas (m)

A_c = luas penampang komposit (m^2)

W_c = tahanan momen penampang komposit (m^3)

V. Lendutan

Nilai lendutan bisa didapatkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\delta = 5/384 \times Q \times (L^4 / (E_{balok} \times I_{xc})) \dots\dots\dots (2.66)$$

dengan :

δ = lendutan balok (m)

Q = beban merata per meter pada balok (kN/m)

L = panjang balok (m)

E_{balok} = Modulus elastisitas balok (kPa)

I_{xc} = inersia penampang komposit (m^4)

W. Gaya Jacking

Gaya sementara yang ditimbulkan oleh alat yang mengakibatkan terjadinya tarik pada tendon di dalam beto prategang. (Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan)

X. Prategang Efektif

Tegangan yang masih bekerja pada tendon setelah semua kehilangan tegangan terjadi, diluar pengaruh beban mati dan beban tambahan. (Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan)

Y. Transfer

Proses penyaluran tegangan dalam tendon prategang dari jack atau perangkat angkur pasca tarik kepada komponen struktur beton. (Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan)