



PENERAPAN BETON PRATEGANG PARSIAL PADA JEMBATAN

Russeno Wirapradja

RINGKASAN.

Jembatan-jembatan beton prategang yang ada kebanyakan direncanakan dengan sistem prategang penuh yang biayanya relatif besar. Salah satu cara untuk menghemat biaya adalah dengan menerapkan sistem beton prategang parsial dengan menggunakan kabel prategang sebagai tulangan aktif dan tulangan biasa sebagai tulangan pasif.

Dalam tulisan ini dikemukakan konsep perhitungan perencanaan dan biaya dari suatu balok prategang parsial jika dibandingkan dengan prategang penuh.

Secara teoritis, balok-balok dapat direncanakan dengan sistem parsial yang mempunyai kekuatan batas yang sama.

Berdasarkan hasil perhitungan disini biaya dapat dikurangi antara 8 - 11 % tergantung kepada besarnya bentangan jembatan.

Dari grafik hubungan antara biaya dan bentang dapat dilihat bahwa makin besar bentang akan semakin besar biaya yang bisa dikurangi.

SUMMARY.

Most existing prestressed concrete bridges and designed with full prestressed which have a **Relative High Cost** One of the ways of obtaining minimum cost is to apply a partially prestressed concrete using a prestressing tendon and mild steel as an active and passive reinforcement respectively.

This paper disctikes the concept of calculation of partially prestressed brain and the assessment of cost compare to the full prestressed.

Theoritically the beams could be designed as a partially prestressed which have the sand ultimate strength.

Base on evaluation results, the cost could be seduced between 8 up to 11 % depend on the magnitude of the bridges span from the relationship between cost and span, it is seen that the increasing in span could increase the reducing of the cost.

PENDAHULUAN.

Beton prategang parsial (partially prestressed concrete) telah banyak dikembangkan di berbagai negara sejak tahun 1948 (Magnel, Abeles, M Birkenmeier dan lain-lain), baik terbatas dalam bentuk percobaan ataupun penerapannya di lapangan.

Di Swiss penggunaan beton prategang parsial ini telah banyak digunakan setelah terbitnya 'S.I.A. Standard' pada tahun 1968, salah satu contohnya adalah jembatan Weinland.

Jembatan beton prategang untuk tipe statis tertentu yang sudah dibangun di Indonesia adalah terdiri dari prategang penuh, di mana tegangan tarik tidak diijinkan. Kalau diteliti lebih jauh terhadap balok-balok ini (Standar Bina Marga) dapat dilihat, bahwa walaupun direncanakan dengan prategang penuh, namun masih digunakan sejumlah tulangan biasa yang berfungsi untuk mengontrol terjadinya retak akibat penyusutan, perubahan temperatur dan lain-lain.

Dengan mengurangi sejumlah baja prategang (40%) yang ada dalam beton prategang penuh dan diganti oleh sejumlah tulangan biasa secukupnya, maka dari sini akan diperoleh suatu balok beton prategang parsial yang lebih ekonomis dengan tidak mengurangi kekuatannya.

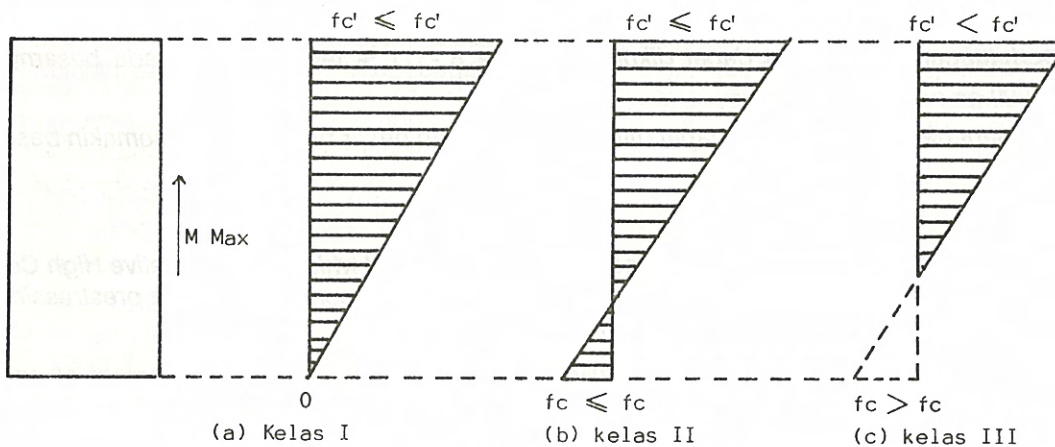
Berdasarkan FIB-CEB commitee, beton prategang dibagi ke dalam tiga kelas, yaitu :

1. **Kelas I, Beton prategang penuh**, di mana tegangan tarik tidak diperbolehkan terjadi pada seluruh penampang (*gambar 1-a*).
2. **Kelas II, Beton prategang terbatas**, di mana tegangan tarik pada penampang diperbolehkan, akan tetapi tegangan tarik yang terjadi tidak boleh melampaui kekuatan tarik beton itu sendiri (*gambar 1-b*).
3. **Kelas III, Beton prategang bertulang**, di mana

tegangan tarik yang terjadi melampaui kemampuan beton terhadap tarik. Jadi di sini diperbolehkan terjadinya retak, akan tetapi lebar retak harus dibatasi sesuai dengan sifat agresif dari lingkungan sekitarnya (*gambar 1-c*).

Adapun yang dimaksud dalam tulisan ini, adalah beton prategang kelas III yang mempunyai kombinasi tulangan aktif dan pasif, di mana kedua-duanya mempunyai kemampuan untuk memikul beban. Jadi fungsi tulangan pasif di sini di samping untuk mengontrol lebar retak juga untuk menambah kemampuan batas dari penampang. Oleh karena kabel prategang mempunyai kemampuan lebih kecil terhadap beban batasnya jika dibandingkan dengan prategang penuh.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah banyak dilakukan di berbagai negara, menunjukkan bahwa beton prategang bertulang mempunyai nilai yang lebih ekonomis jika dibandingkan dengan prategang



Gambar 1 : Diagram tegangan pada beban kerja maksimum

penuh. Selain itu lendutan ke atas akibat adanya eksentrisitas bisa dikontrol (pada keadaan awal). Sedangkan prosentase prategang minimum yang paling aman adalah sebesar 60 % dari prategang penuhnya. Jelas di sini bahwa dengan sisa 40 % yang digantikan oleh tulangan pasif akan diperoleh suatu pengurangan biaya.

KONSEP PERHITUNGAN

Dalam mendesain beton prategang bertulang dengan cara elastis (pada beban kerja) sangatlah sulit, oleh karena beton bertulang biasa dihitung berdasarkan pada penampang retak, di mana tulangan di sini berfungsi untuk mengambil alih gaya tarik yang tidak bisa dipikul oleh beton. Sedangkan pada beton prategang perhitungan didasarkan pada penampang utuh, di mana beton tidak boleh retak.

Walaupun beton bertulang biasa mempunyai sifat yang berbeda dengan beton prategang pada tahap beban kerja, akan tetapi pada keadaan batas kedua konstruksi tersebut mempunyai sifat yang serupa.

1. Keadaan elastis.

Dalam analisa penampang untuk balok beton prategang dalam keadaan retak, di sini perhitungannya menjadi sulit. Oleh karena letak garis netral selain tergantung kepada geometris penampang dan sifat bahan, juga tergantung kepada gaya prategang dan pembebanannya.

Untuk memudahkan perhitungan di sini akan ditinjau tegangan dan regangan yang terjadi pada beton, baja tulangan aktif dan pasif dalam 3 tahap pembebanan seperti ditunjukkan dalam *gambar 2*.

Tahap (1). Pada tahap ini dimisalkan beban yang bekerja hanya gaya prategang efektif P_e saja, tegangan pada tulangan aktif :

$$f_{p1} = f_{pe} = \frac{P_e}{A_p}$$

Dengan asumsi bahwa terjadi ikatan yang baik antara baja dengan beton, maka regangan pada tulangan pasif sama dengan regangan pada beton.

Sehingga tegangan tekan pada tulangan pasif :

$$f_{s1} = -E_s \sum s_2$$

Tahap (2). Pada tahap ini dimisalkan bekerja suatu beban yang menyebabkan terjadinya dekomposisi pada beton (dekomposisi adalah di mana regangan pada beton nol), maka beralihnya pembebanan dari tahap (1) ke tahap (2) akan menyebabkan penambahan tegangan pada tulangan aktif dan pasif (*gambar 2b*), sebesar :

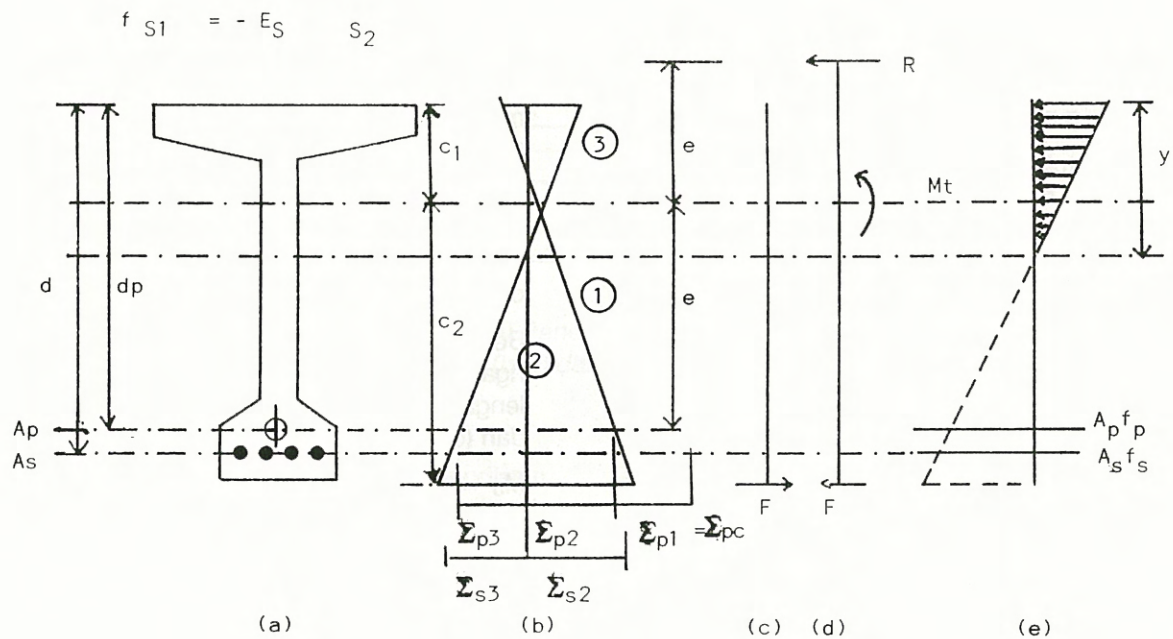
$$f_{p2} = E_p \sum p_2$$

$$f_{s2} = E_s \sum s_2$$

Sehingga besarnya tegangan pada tulangan pasif menjadi :

$$f_s = E_s (-s_2 + \sum s_2) = 0$$

Perubahan regangan pada tulangan aktif akan sama



Gambar 2 (a) Penampang, (b) regangan, (c) & (d) gaya (e) tegangan

dengan perubahan regangan pada beton. Berdasarkan penampang utuh, maka akan diperoleh:

$$\Sigma_{p2} = \frac{pe}{A_e E_e} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right)$$

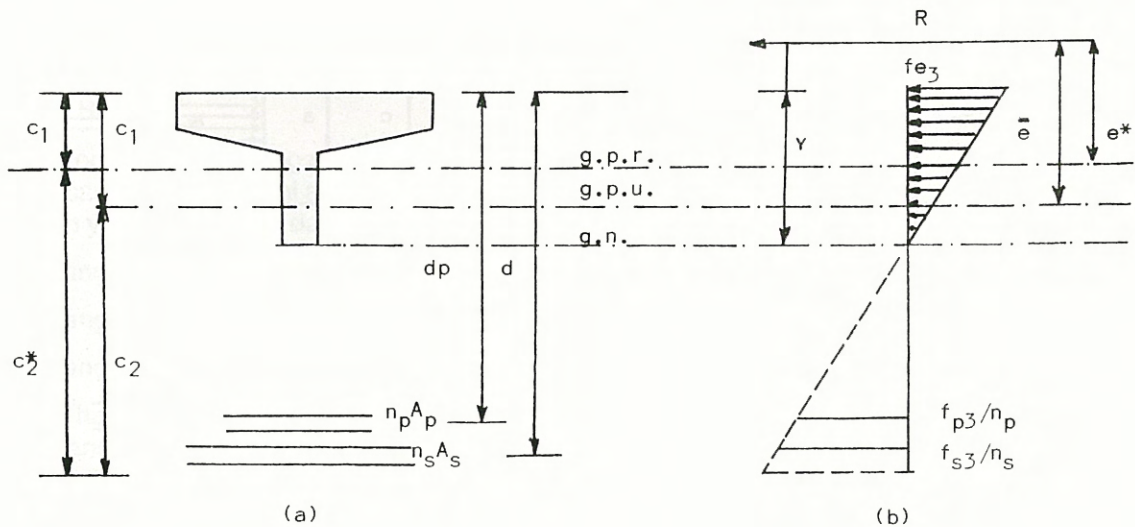
Pada tahap (2) ini, tulangan pasif tidak mempunyai tegangan pada beton juga nol, maka di sini tendon harus ditarik dengan gaya khayal (gambar 2c) sebesar :

$$F = A_p (f_{p1} + f_{p2})$$

Sekarang gaya F ini dihapuskan oleh gaya F yang berlawanan arah (gambar 2d). Dengan mengambil resultante R akibat Mt dan gaya F, maka diperoleh :

$$\bar{e} = \frac{Mt - F \cdot e}{R}$$

Setelah besar-besaran f, F, R dan \bar{e} didapat, selanjutnya pada pembebanan tahap (3) yaitu setelah terjadi dekompresi perhitungan menjadi lebih mudah. Di sini analisa seperti pada beton bertulang biasa, di mana penampang dalam keadaan retak dengan beban merupakan kombinasi antara momen lentur M dan gaya eksentris R , lihat gambar 3 (a) dan (b).



Gambar 3 (a) Panampang. (b) Tegangan.

- Catatan: - g.p.r. = garis berat penampang retak
 - g.p.u. = garis berat penampang utuh
 - g.n. = garis netral

Di sini luas tulangan aktif dan tulangan pasif diganti dengan luas tulangan beton menjadi $n_p A_s$ dan $n_s A_s$.

Dengan keseimbangan gaya, maka akan diperoleh harga y , yang selanjutnya apabila harga y sudah diketahui besaran-besaran lainnya dapat dihitung.

Besarnya tegangan yang terjadi pada beton, tulangan aktif dan tulangan pasif, yaitu :

$$f_c^3 = \frac{R}{A_{ct}} - \frac{R \cdot e^* \cdot c_1^*}{I_{ct}}$$

$$f_{p3} = n_p \left(\frac{R}{A_{ct}} + \frac{R \cdot e^* (d_p - c_1)}{I_{ct}} \right)$$

$$f_{s3} = n_s \left(\frac{R}{A_{ct}} + \frac{R \cdot e^* (d_s - c_1)^*}{I_{ct}} \right)$$

Sehingga tegangan-tegangan akibat beban kerja maksimum menjadi

$$f_p = f_{p1} + f_{p2} + f_{p3}$$

$$f_s = f_{s3}$$

$$f_c = f_c^3$$

2. Keadaan batas.

Keadaan batas untuk elemen tertentur diperoleh apabila perpendekan beton (serat yang tertekan) mencapai 3,5% atau perpanjangan baja (serat tertarik) mencapai 10% yang dihitung setelah terjadinya dekompresi.

Dengan cara coba-coba tegangan yang terjadi pada tulangan aktif dan dimisalkan dulu tulangan pasif mencapai tegangan lelehnya, maka dari sini akan diperoleh harga a atau c . Selanjutnya dari diagram regangan (gambar 4b) setelah terjadi dekompresi akan didapat harga Σp_3 dan Σs_3 .

Kemudian cek regangan yang terjadi apakah sesuai dengan pemisalan atau tidak.

Besarnya momen batas bisa dihitung dengan mengalikan gaya pada tulangan aktif dan pasif dengan lengan momennya yang besarnya adalah $(d_p - 1/2a)$ dan $(d - 1/2a)$, atau :

$$M_u = A_p f_p (d_p - 1/2a) + A_s f_s (d - 1/2a).$$

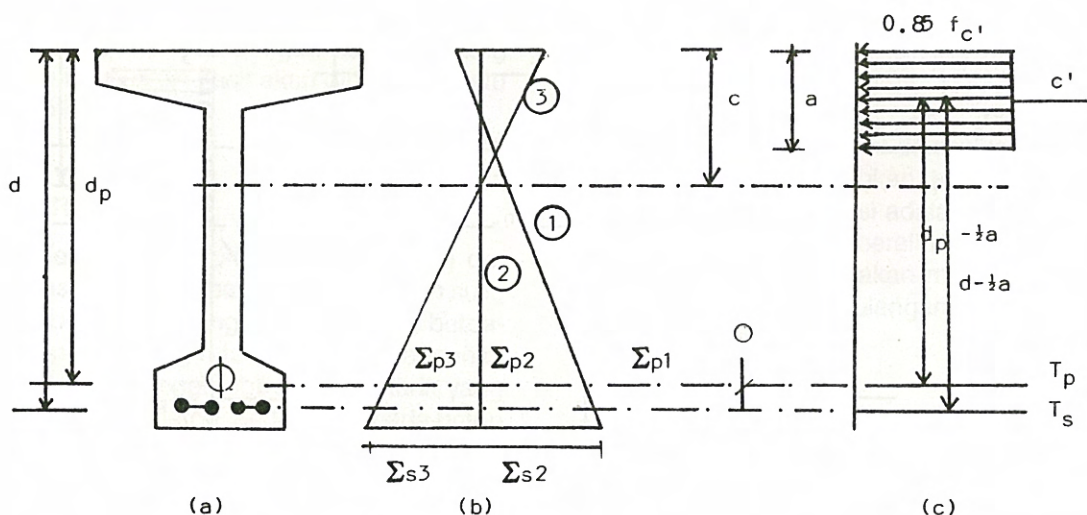
Prosentase prategang dihitung berdasarkan keseimbangan gaya, atau :

$$\text{Prosentase prategang} = \frac{T_p \cdot Z_p}{T_p \cdot Z_p + T_s \cdot Z} \times 100 \%$$

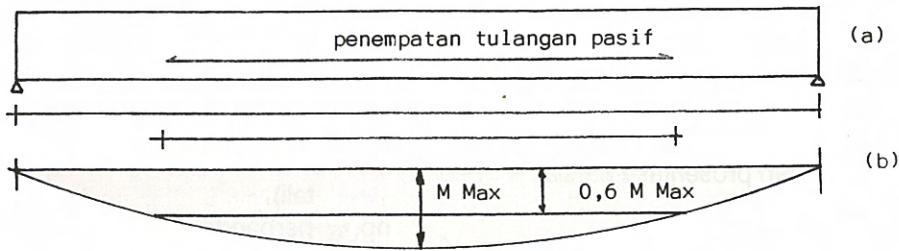
- (i) Apabila prosentase prategang yang diperoleh $\geq 60\%$, maka di sini sifat-sifat balok beton akan mendekati sifat beton prategang penuh.
- (ii) Apabila prosentase tersebut di atas $\leq 60\%$, maka sifat-sifat balok beton akan mendekati sifat beton bertulang biasa.

3. Penempatan tulangan pasif.

Untuk lebih menghemat biaya di sini tulangan pasif tidak perlu dipasang sepanjang bentangan balok, akan tetapi cukup pada daerah di mana momen yang terjadi lebih besar atau sama dengan $0,6 M_{max}$, lihat gambar 5.



Gambar 4 (a) penampang, (b) regangan, (c) tegangan.



Gambar 5. (a) Penempatan tulangan pasif.
(b) Bidang Momen

4. Saran perencanaan.

Untuk memudahkan perhitungan dalam mendisain balok beton prategang bertulang di sini akan diberikan beberapa langkah perhitungan sebagai berikut :

- (i) Balok beton direncanakan dulu sebagai prategang penuh untuk mendapatkan dimensi penampang, gaya prategang efektif P_e , exentrisitas e dan besarnya momen batas M_u .
 - (ii) Rencanakan balok tersebut di atas sebagai balok beton prategang parsial, yaitu dengan mengambil dulu gaya prategang sebesar 40% yang akan diganti dengan tulangan biasa.
- Atau 60% M_u dipikul oleh prategang dan 40% M_u oleh tulangan biasa.
- (iii) Dari diagram regangan dan tegangan dalam keadaan batas dari sini akan didapat luas tulangan pasif.
 - (iv) Cek tegangan-tegangan yang terjadi pada tahap beban maksimum bekerja berdasarkan pada analisa penampang retak.
 - (v) Hitung momen maksimum dan hitung faktor keamanan terhadap beban batasnya.
 - (vi) Kemungkinan perhitungan ini harus diulang beberapa kali (cara coba-coba) mulai dari tahap (ii).

EVALUASI HARGA

Dengan mengganti baja prategang dengan tulangan biasa sebesar $\pm 40\%$, dari sini akan diperoleh suatu keuntungan yang didapatkan dari :

- (i) Pengurangan jumlah tendon berikut ankernya.
- (ii) Pengurangan tulangan end block.
- (iii) Pengurangan biaya grouting.

Perbedaan harga material dari balok prategang parsial jika dibandingkan dengan prategang penuh contohnya bisa dilihat dalam tabel-1.

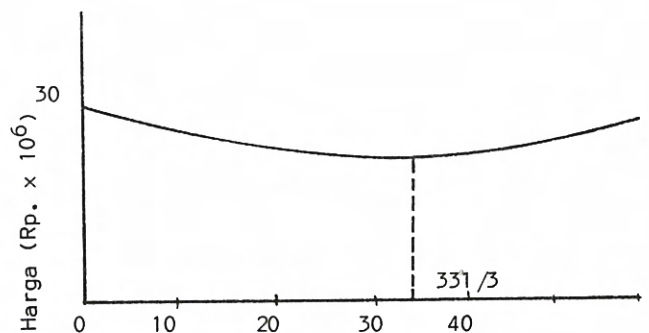
Dari tabel ini, maka untuk bentang 45 m dengan pembebanan BM- 100%, diperoleh suatu keuntungan apabila menggunakan prategang parsial sebesar Rp.2.613.052/balok.

Tabel -1. Balok dengan bentang 45 m, prosentase parsial 33 1/3 %.

Jenis Bahan	Satuan	Harga Satuan Rp.	Prategang Penuh		Prategang Parsial	
			Volume	Harga	Volume	Harga
Beton K-350	m ³	80.000	53,069	4.245.520	53,069	4.245.520
Tulangan	kg	700	848	593.600	3887	2.720.900
Tulangan geser	kg	700	8303	5.812.100	8303	5.812.100
Tulangan end block	kg	700	204	142.800	136	95.200
Tendon VSL-12 berikut anker	bh	2.336.926	6	14.021.556	4	9.347.704
Bgkisting	m3	250.000	17,5	4.375.000	17,5	4.375.000
Grouting	zak	4.200	13,5	56.700	9	37.800
	Jumlah			29.247.276		26.634.224

Apabila untuk setiap bentang baik untuk prategang penuh ataupun prategang parsial harganya dihitung dan diplot ke dalam suatu grafik, maka akan diperoleh hubungan antara harga dengan bentang seperti ditunjukkan dalam gambar 7.

Di sini terlihat bahwa semakin besar bentang maka akan semakin besar pengurangan harga yang bisa diperoleh.

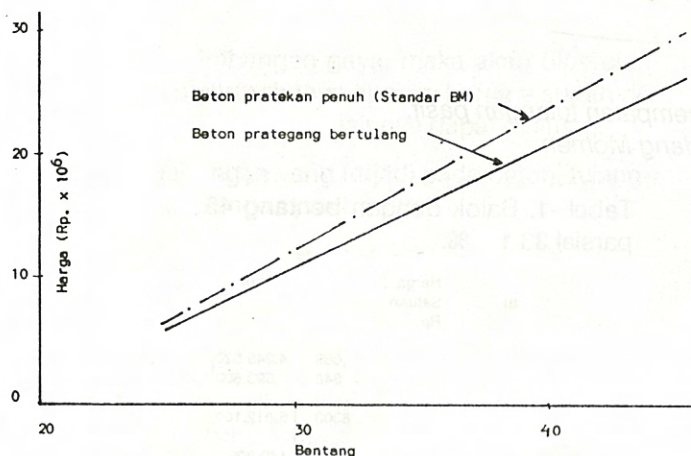


Gambar 6 : Grafik hubungan antara % parsial dengan harga untuk bentang 45 m.

Prosentase parsial sebesar 33 1/3%, di sini adalah harga yang paling optimum untuk bentang 45 m bila menggunakan sistem post-tensioned. Hal ini disebabkan karena pada sistem ini sebagian besar pengurangan biaya terletak pada tendon berikut sistem ankernya. Untuk bentang-bentang yang lain besarnya prosentase optimum sangat tergantung kepada jumlah tendon.

Sehingga dengan demikian setiap balok akan mempunyai grafik hubungan antara harga dan prosentase partial yang berbeda-beda.

Salah satu contoh di sini bisa dilihat (*gambar 6*) grafik hubungan antara harga dan prosentase partial.



Gambar 7. Hubungan antara bentang dengan harga, untuk setiap balok.

PERMASALAHAN.

Oleh karena beton prategang parsial ini belum diterapkan di Indonesia untuk jembatan, maka ada beberapa hal yang memerlukan penelitian lebih lanjut, yaitu :

- (i) Penentuan tinggi dan lebar retak pada beban maksimum.
- (ii) Efek beban dinamis terhadap ketahanan dari struktur.

NOTASI.

- A_p = luas tulangan aktif.
- A_s = luas tulangan pasif.
- a = tinggi equivalent stress block
- C = gaya tekan pada beton.
- c = jarak garis netral ke serat yang paling tertekan
- c_1 = jarak garis berat penampang utuh ke serat yang paling tertekan.
- c_2 = jarak garis berat penampang utuh ke serat yang paling tertarik.
- c_1^* = jarak garis berat penampang retak ke serat yang paling tertarik.
- c_2^* = jarak garis berat penampang retak ke serat yang paling tertarik.
- d = jarak garis berat tulangan pasif ke serat yang paling tertekan.
- d_p = jarak garis berat tulangan aktif ke serat yang paling tertekan.
- e = eksentrisitas gaya pratekan.
- e = eksentrisitas gaya R dihitung dari garis berat penampang penuh.
- e^* = eksentrisitas gaya R dihitung dari garis berat-

penampang retak.

- f_c = tegangan pada beton.
- f_p = tegangan pada tulangan aktif.
- f_s = tegangan pada tulangan pasif.
- M = momen. (M_u = momen batas, M_t = momen tali).
- np = perbandingan antara modulus elastisitas tulangan aktif dengan beton.
- ns = perbandingan antara modulus elastisitas tulangan pasif dengan beton.
- pe = gaya pratekan efektif.
- R = resultante gaya.
- T_p = gaya pada tulangan aktif.
- T_s = gaya pada tulangan pasif.
- y = jarak garis netral ke serat yang paling tertekan.
- Z = lengan momen dari gaya T_s .
- Z_a = lengan momen dari gaya T_p .
- ϵ_c = regangan beton.
- ϵ_p = regangan tulangan aktif.
- ϵ_s = regangan tulangan pasif.

DAFTAR PUSTAKA

1. T.Y. Lin, Design of Prestressed Concrete Structure.
2. A.S.G. Bruggeling, Structural Concrete: Science into practice. HERON volume 32 - 1987 No. 2.
3. Dr. Ir. H. Ridwan Suhud, Beton Prategang Parsial.
4. Guyon. Y. Limit State Design of Prestressed Concrete Vol. 1.
5. Guyon. Y. Limit State Design of Prestressed Concrete Vol. 2.
6. Nilson A.H, Design of Prestressed Concrete Structures.
7. P.W. Abeles; B.K. Bardhan- Roy; F.H. Turner, Prestressed Concrete Designer's Handbook.
8. Antoine E. Naaman, Prestressed Concrete Analysis and Design.

Penulis

Ir. Russeno Wirapraja, Msc.
Peneliti Bidang Konstruksi Bangunan Pelengkap Jalan
Bekerja di Pusat Litbang Jalan Sejak Tahun 1980