

## Minimalisasi Camber Dalam Peningkatan Kelayakan Sistem Beton Prategang

<sup>1</sup>Okke Oktavia Natalia Tumbuan, <sup>2</sup>Hari Nugraha Nurjaman,  
<sup>3</sup>Fitri Suryani, <sup>4</sup>Dwi Dinariana  
<sup>1,2,3,4</sup>Program Sudi S1 Teknik Sipil, Universitas Persada Indonesia Y.A.I, Jakarta

E-mail: <sup>1</sup> [okkeoktavia25@gmail.com](mailto:okkeoktavia25@gmail.com), <sup>2</sup> [hari.nugraha@upi-yai.ac.id](mailto:hari.nugraha@upi-yai.ac.id),  
<sup>3</sup> [fitrisuryani@upi-yai.ac.id](mailto:fitrisuryani@upi-yai.ac.id), <sup>4</sup> [dwidinariana@upi-yai.ac.id](mailto:dwidinariana@upi-yai.ac.id)

### ABSTRAK

Sebagaimana diketahui, kelemahan material beton dalam tarik diatasi dengan tiga cara, yaitu beton bertulang (reinforced concrete, R/C), beton komposit (composite concrete, C/C), dan beton prategang (prestressed concrete, P/C). Jika tulangan dan baja dalam beton bertulang dan beton komposit tidak menimbulkan lendutan, maka gaya prategang menimbulkan lendutan yang berlawanan dengan lendutan yang ditimbulkan oleh beban luar. Lendutan akibat gaya prategang ini dinamakan camber, merupakan lendutan yang menurunkan kelayakan struktur dan yang perlu diminimalkan. Dalam tulisan disajikan dua macam cara untuk meminimalkan camber, yaitu cara beton prategang parsial yang menggunakan baja tulangan biasa di dalam mengambil alih sebagian momen, sehingga digunakan gaya prategang yang lebih kecil serta yang pada gilirannya menurunkan magnitudo camber. Cara kedua adalah dengan menggunakan strand debonded yang menghilangkan lekatan antara strand dan beton, sedemikian hingga momen yang dipikul oleh gaya prategang tereduksi yang pada gilirannya menurunkan magnitudo camber. Metoda beton prategang parsial diterapkan kepada beton prategang pasca tarik dan metoda strand debonded kepada beton prategang pratarik. Kedua metoda reduksi camber memberikan hasil yang cukup efektif dalam mereduksi camber dan meningkatkan kelayakan struktur beton prategang.

**Kata kunci : Camber, Balok Prategang, Sistem Pratarik, Sistem Pasca Tarik, Metoda Strand Debonded, Sistem Prategang Parsiali**

### ABSTRACT

*As is known, the weakness of concrete material in tension is overcome in three ways, namely reinforced concrete (R/C), composite concrete (C/C), and prestressed concrete (P/C). If the reinforcement and steel in reinforced concrete and composite concrete do not cause deflection, then the prestressing force causes deflection that is opposite to the deflection caused by the external load. The deflection due to this prestressing force is called camber, which is a deflection that reduces the serviceability of the structure and needs to be minimized. In this article, two ways are presented to minimize camber, namely the partial prestressed concrete method that uses ordinary reinforcing steel to take over part of the moment, so that a smaller prestressing force is used and which in turn reduces the magnitude of camber. The second way is to use a debonded strand that eliminates the bond between the strand and the concrete, so that the moment carried by the prestressing force is reduced which in turn reduces the magnitude of camber. The partial prestressed concrete method is applied to post-tensioned prestressed concrete and the strand debonded method to pre-tensioned prestressed concrete. Both camber reduction methods provide quite effective results in reducing camber and improving the serviceability of prestressed concrete structures.*

**Keyword : Camber, Prestressed Beam, Pretensioning System, Post-tensioning System, Strand Debonded Method, Partial Prestressed System**

## 1. PENDAHULUAN

Dibandingkan dengan bahan bangunan baja yang memiliki kekuatan yang hampir setara dalam tarik dan tekan (dengan catatan, tekuk tidak terjadi) serta yang relatif isotrop dan homogen, maka beton merupakan bahan bangunan yang pada hematnya tidak isotrop atau homogen. Selain itu, beton relatif kuat terhadap tekan, namun kekuatannya terhadap tarik relatif kecil, sehingga dalam praktek desain, kerap diabaikan saja, meski kekuatan tarik (momen retak) masih kerap dipertimbangkan. Penanganan masalah tarik menjadi aspek yang sangat sentral di dalam praktek teknologi dan konstruksi beton, yang perlu mendapatkan perhatian. Pada sistem beton prategang (*prestressed concrete, P/C*) baja berkekuatan tarik tinggi ditegangkan dengan gaya tarik tertentu, lalu beton dicorkan dan setelah beton cukup mengeras, ujung kabel lalu diputus.

Kabel prategang menimbulkan perpindahan melawan perpindahan akibat beban luar, yang dinamakan perpindahan sembulan atau kamber (*camber*) karena gaya prategang menimbulkan momen yang melawan momen akibat beban luar. Perpindahan ke atas (*camber*) itu sendiri pada umumnya tidak menimbulkan kerusakan struktural sistem struktur (balok). Namun, *camber* akan menimbulkan ketidaknyamanan pengguna; misalnya, guncangan terhadap penyetir kendaraan. Terlebih sekarang ini, dengan menjamurnya jalan – jalan tol dengan kendaraan yang terpancing berkecepatan tinggi, adanya *camber* membuat ketidaknyamanan pengguna; dengan perkataan lain, mengurangi kelayakan sistem struktur. Dengan demikian, masalah akibat timbulnya kamber perlu diatasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengurangi atau mengontrol magnitudo dari *camber* dalam upaya meningkatkan kelayakan sistem struktur yang sedang ditangani.

## 2. LANDASAN TEORI

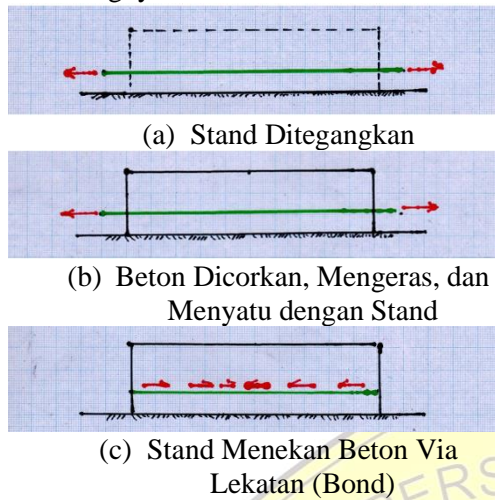
### 2.1 Sistem Beton Prategang

Perkembangan sistem transportasi di tanah air sangat pesat dalam beberapa dekade belakangan ini, khususnya dalam aspek transportasi pada umumnya atau jalan raya pada khususnya. Belakangan ini, di tanah air dibangun jalan toll secara besar – besaran. Sebagai contoh, dibangun jalan toll Jagorawi sebagai jalan toll yang pertama di Indonesia, yang segera diikuti oleh pembangunan jalan toll di daerah maupun di pulau – pulau lainnya. Selain jalan toll di permukaan, banyak pula dibangun jalan toll berupa jalan layang (*elevated toll roads*). Sistem beton prategang memiliki beberapa keuntungan maupun kerugian. Keuntungan yang terutama adalah tereliminirnya daerah tarik pada penampang, sehingga keseluruhan penampang beton bekerja secara efisien. Kerugian yang terutama adalah sifat kabel prategang yang aktif bekerja bahkan sebelum beban – beban luar bekerja. Kabel prategang dengan gaya prategang yang aktif bekerja, menimbulkan lendutan ke atas, yang lazim disebut sembulan ke atas, atau kamber (*camber*). Dari segi aturan, SNI 2847:2019 menyatakan bahwa jika *camber* tidak menimbulkan kerusakan pada bagian konstruksi yang didukungnya, maka *camber* dapat ditolerir. Namun yang menjadi masalah akibat *camber*, adalah berkurangnya kelayakan jalan raya bagi pengguna jalan.

### 2.2 Sistem Beton Prategang Pratarik

Sistem beton parategang pratarik umumnya diterapkan pada balok berbentang sedang dengan beban yang tidak begitu besar. Pertama – tama, kabel direntangkan bebas lalu ditarik, dalam keadaan ujung tertambat, beton lalu dicorkan dan mengeras dan menyatu dengan kabel yang terbuka. Kemudian kabel diputus pada kedua ujung, kabel yang berupaya kembali ke bentuk semula, memberikan efek tekan terhadap beton. Tekan ini dirambatkan kabel melalui

lekatan (bond) antara kabel dengan beton sekelilingnya.

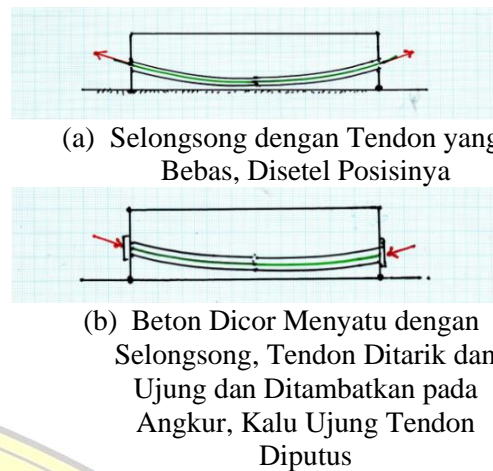


Gambar 1 Sistem Beton Prategang Pratarik

Dengan demikian, dalam menerapkan sistem ini, perlu diperhatikan beberapa hal. Pertama, bond antara beton dan kabel harus dijamin terjadi secara baik. Permukaan kabel harus bebas dari karat, serpihan lepas, terutama harus bebas dari minyak dan material licin semacamnya. Kedua, karena kabel ditarik sebelum beton ada, bentuk hanya bisa berbentuk lurus (*straight*) atau semi lurus (*piece wise linear*).

### 2.3 Sistem Beton Prategang Pasca Tarik

Dalam sistem beton prategang pasca tarik, kabel ditempatkan bebas (*loose*) di dalam suatu selongsong (*hose*) yang keras namun fleksibel. Selongsong digantungkan kepada tulangan memanjang atau sengkang balok dalam bentuk (fungsi) yang diinginkan. Setelah itu, beton dicor dan ditunggu mengeras, selongsong sekarang menyatu dengan beton yang mengeras, namun kabel masih bebas di dalam selongsong. Lalu kabel ditarik dengan gaya tertentu. Kemudian, ujungnya ditambatkan pada ujung balok via ankur (*anchorage*), lalu diputus. Kabel dengan ujung bebas betendensi untuk kembali ke bentuk semula, dan upaya ini memberikan efek tekanan kepada beton via ankur.



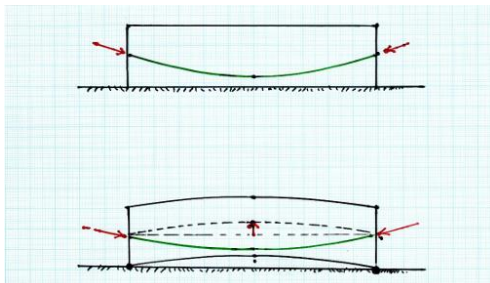
Gambar 2 Sistem Beton Prategang Pasca Tarik

Dalam sistem beton prategang pasca tarik perlu diberikan beberapa catatan. Pertama, kabel yang tertegang masih bebas terhadap selongsong dan tidak dibutuhkan kerja sama antara keduanya, Namun, untuk melindungi kabel yang tertarik seumur layan hidupnya, perlu dilindungi terhadap karat dan gangguan luar lainnya. Makanya, ruang antara kabel dengan selongsong umumnya diberi isian atau epoxy. Kedua, gaya prategang menekan beton via ankur, yang merupakan lokasi terbatas dengan konsentrasi tegangan yang tinggi, Karena performa ankur sangat menentukan, perlu diberi perhatian untuk memberikan sengkang yang cukup pada daerah ankur untuk menangani tegangan hancur (*bursting*).

### 2.4 Masalah Camber Dalam Sistem Beton Prategang

Untuk menerangkan masalah camber, disini diberikan bebepa contoh kejadian camber. Pertama, andaikanlah kita hadapi suatu gelagar jembatan berupa sistem beton prategang. Jika bentang balok dimisalkan  $L = 15 \text{ meter}$  dan diimensi balok  $b \times d = 0.40 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ . Gaya prategang efektif yang diperlukan katakanlah  $F_{eff} = 3760 \text{ kN}$  dengan eksentrisitas di tengah bentang  $e_0 = -0.170 \text{ m}$ . Selain bobot sendiri, balok

mendukung beban superimpos  $qsd = 11.25 \text{ kN/m}$ , beban hidup merata  $q\ell = 11.25 \text{ kN/m}$  dan beban hidup terpusat  $P\ell = 61.25 \text{ kN}$ .



Gambar 3 *Camber Dalam Balok Beton Prategang*

Besarnya camber berbanding lurus dengan besarnya gaya prategang, berbanding terbalik dengan modulus elastisitas bahan, berbanding terbalik dengan momen inersia penampang, dan berbanding pangkat empat dengan bentang balok. Dengan demikian, masalah camber semakin krusial untuk kasus balok dengan bentang besar.

### 3. METODOLOGI

#### 3.1 Desain Balok Beton Prategang

Sebelum melanjutkan rangkuman desain dari beton prategang, perlu diutarakan bahwa dalam konstruksi beton prategang, kita perlu memiliki perhitungan dan pemeriksaan kondisi tegangan secara tepat, dan ini hanya diperoleh dalam sistem struktur yang linier elastis, di mana hukum superposisi berlaku. Dengan demikian, desain beton prategang didasarkan atas telaah elastis linier. Hanya saja, di beberapa lokasi, perlu diperiksa kapasitas batas penampang; misalnya, kapasitas batas momen di tengah bentang dan kapasitas batas geser pada perletakan sistem balok sederhana.

##### 3.1.1 Mutu Bahan dan Tegangan Izin Material

Berikut ini diberikan data mengenai mutu dan tegangan izin beton, kabel prategang dan baja tulangan biasa.

- Kuat tekan karakteristik beton,  $f_c'$
- Kuat tekan izin beton,  $f_{cs} = 0.45 f_c'$  □
- Kuat tarik izin beton,  $f_{ts} = -0.50 \sqrt{f_c'}$
- Tegangan izin kabel:  $0.82 f_{py}$  atau  $0.74 f_{pu}$

#### 3.1.2 Perjanjian Tanda

- Dalam keseluruhan tulisan pembahasan, digunakan perjanjian tanda sebagai berikut ini. Perpindahan dan eksentrisitas diberi tanda positif jika mengarah ke atas, dan diberi tanda negatif jika sebaliknya.
- Gaya atau tegangan diberi tanda positif jika bersifat tekan dan negatif jika bersifat tarik pada penampang.
- Momen diberi tanda positif jika memberikan efek tekan pada serat atas penampang, dan diberi tanda negatif jika sebaliknya.

#### 3.1.3 Geometri Struktur

Dalam tulisan, dibahas sistem balok sederhana. Geometri gelagar dan struktur adalah sebagai berikut ini.

- Bentang :  $L$
- Dimensi penampang :  $b \times d$
- Selimut beton :  $s$
- Spasi Sengkang :  $sv$
- Tebal pelat slab :  $ts$
- Tebal perkerasan :  $tp$
- Luas total strand atau tendon :  $Ap$
- Luas tulangan biasa :  $As$
- Luas Sengkang :  $Av$

#### 3.1.4 Tahap Penarikan dan Operasi Kabel

Transfer tegangan dari kabel ke beton membutuhkan waktu untuk efektif. Metoda pengerjaan di lapangan, jenis sistem dan metoda penarikan strand atau kabel, serta waktu yang dibutuhkan

membuat proses pekerjaan terbagi atas beberapa tahap sebagai berikut:

- Tahap transfer: penarikan kabel dan pengalihan tegangan dari strand ke beton. Yang bekerja dalam tahap ini adalah gaya prategang awal sebelum kehilangan prategang, dan berat sendiri gelagar.
- Tahap ereksi: tahap pemasangan komponen, dengan yang bekerja adalah gaya prategang setelah kehilangan prategang jangka pendek, bobot mati gelagar, beban mati superimpos, dan beban alat kerja.
- Tahap layan: pada saat konstruksi telah selesai dikerjakan, dan yang bekerja adalah gaya prategang setelah semua kehilangan prategang terjadi, serta momen akibat semua beban mati dan semua beban hidup, kecuali beban alat ereksi bekerja.

### 3.2 Teorema Balok Konyugasi

Metoda balok konyugasi merupakan suatu varian dari pada pemanfaatan metoda bidang momen dibagi dengan faktor  $EI$ , sebagai "beban" dalam perhitungan perpindahan dan rotasi balok.

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left[ \frac{d}{dx} w(x) \right] = \frac{d}{dx} [\phi(x)] = \frac{M(x)}{EI}$$

Sehingga

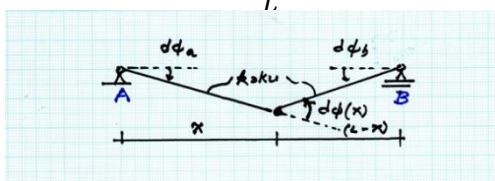
$$d\phi(x) = \frac{M(x)}{EI} dx$$

Jika kita memberikan rotasi  $d\phi(x)$  pada lokasi  $x$ , sementara bagian batang lainnya kaku tak terhingga, maka dalam pila perpindahan badan kaku (rigid body motion) seperti ini, rotasi di ujung  $A$  dan  $B$  menjadi

$$d\phi(x)_a = \frac{L-x}{L} d\phi(x); d\phi(x)_b = +\frac{x}{L} d\phi(x)$$

Sehingga

$$dw(x) = \frac{x(L-x)}{L} d\phi(x)$$



Gambar 4 Metoda Balok Konyugasi

Bentuk – bentuk di atas menyerupai kasus balok sederhana dengan beban terpusat pada lokasi  $x$ . Artinya, jika  $d\phi(x)$  dipandang sebagai gaya di atas suatu "balok konyugasi", maka  $d\phi_a$  dan  $d\phi_b$  berupa "gaya lintang" dan  $dw(x)$  berupa "momen". Keduanya masing-masing memberikan rotasi pada kedua perletakan dan perpindahan balok sederhana yang sesungguhnya. Suatu "balok" yang memiliki sifat seperti ini dinamakan balok konjugasi (*conjugate beam*).

Tabel 1 Hubungan Balok Riel Dengan Balok Konyugasi

balok		konyugasi	
beban	$q$		
perpindahan	$w$	$\hat{M}$	momen
rotasi	$\theta$	$\hat{V}$	gaya geser
momen	$M$	$\frac{M}{EI} = \hat{q}$	beban

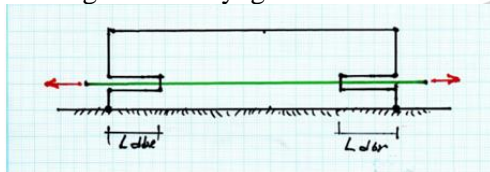
Untuk ujung bebas balok sebenarnya, perpindahan  $w$  dan rotasi  $\phi$  adalah bebas, sehingga momen  $M$  dan geser  $V$  dalam balok konjugasi dibuat tidak nol. Ini berarti bahwa ujung bebas balok sebenarnya diwakili oleh ujung jepit pada balok konjugasi. Untuk perletakan sendi balok sebenarnya,  $\phi \neq 0$  dan  $w = 0$ , sehingga dalam balok konjugasi  $V \neq 0$  dan  $\hat{M} = 0$ . Ini berarti bahwa perletakan sendi balok sebenarnya diwakili oleh perletakan sendi pada balok konjugasi.

### 3.3 Balok Dengan Strand Debonded

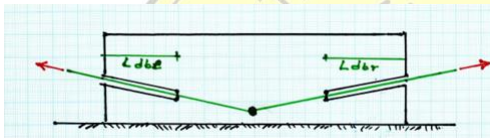
Telah diterangkan dalam bahasan awal bahwa strand atau kabel yang didebonded adalah bagian kabel yang sewaktu beton dicor, dilindungi dalam selongsong. Setelah beton mengeras, selongsong menyatu dengan beton yang mengeras, tetapi bagian kabel yang ada di dalam selongsong masih bebas. Ketika ujung kabel dipotong, potongan kabel menjadi kehilangan tegangan sama sekali, dan tidak ada lekatan antara kabel debonded dengan beton. Ini berarti bahwa daerah kabel debonded tidak menimbulkan momen sama sekali.

Karena kita menentukan lokasi penempatan daerah debonded sewaktu baton belum dicor, maka cara debonded ini hanya bisa digunakan untuk kasus beton prategang sistem pratarik.

kabel lurus dengan gaya prategang  $F$  dan eksentrisitas  $e$  yang konstan, Ujung kiri didebonded sepanjang  $L_{dbl}$  dan ujung kanan sepanjang  $L_{dbr}$ . Model konyugasi dengan gaya luar  $\frac{m(x)}{EI} = \frac{Pe}{EI}$  menimbulkan momen tengah bentang balok konyugasi.



Gambar 5 Balok Pratarik Dengan Strand Lurus Debonded



Gambar 6 Balok Pratarik Dengan Strand Segi Tiga Debonded

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Desain Balok Prategang

Pembebanan dan proses desain didasarkan atas standard SNI 1725:2019. Penampang yang digunakan berbentuk persegi. Desain dilakukan untuk dua kasus, yaitu kasus balok prategang pasca tarik dengan strand berbentuk parabola, dan balok prategang pratarik berupa strand lurus.

#### 4.1.1 Data Material

Data mengenai material yang digunakan adalah sebagai berikut.

(a) Beton:

- Kuat tekan beton karakteristik  $f_c' = 60 \text{ mPa}$  35
- Tegangan izin,
  1.  $f_{cs} = 0.45 f_c' = 27 \text{ mPa}$  (pada saat layan)
  2.  $f_{ct} = 0.60 f_c'$  (pada saat transfer)
- Tarik izin,

1.  $f_{ts} = -0.50 \sqrt{f_c'} = -3.87 \text{ mPa}$  (saat transfer)

2.  $f_{tt} = -0.25 \sqrt{f_c'} = -1.94 \text{ mPa}$  (saat layan)

- Modulus elastisitas  $E_s = 200\,000 \text{ mPa}$

(b) Baja prategang:

- Kuat leleh,  $f_{py} = 1680 \text{ mPa}$
- Kuat tarik  $f_{pu} = 1860 \text{ mPa}$
- Modulus elastisitas  $E_s = 200\,000 \text{ mPa}$
- Tegangan izin
  - $0.82 f_{py}$  atau  $\leq 0.74 f_{pu}$

(c) Besi tulangan:

- Kuat leleh,  $y = 400 \text{ mPa}$  (tulangan memanjang) =  $250 \text{ mPa}$  (sengkang)
- Modulus elastisitas :  $E_s = 200\,000 \text{ mPa}$

#### 4.1.2 Geometri Struktural

Dalam hal ini, yang dibahas dalam desain adalah gelagar beton prategang jembatan dengan pembebanan menurut SNI 1725:2016.

- Bentang
- Penampang:  
Dimensi  $b \times d = 0.60 \text{ m} \times 1.75 \text{ m}$   
Luas :  $L = A_c = b \times d = 0.60 \text{ m} \times 1.75 = 1.05 \text{ m}^2$   
Momen inersia :  $I_{zz} = \frac{1}{12} b d^3 = 0.268 \text{ m}^4$
- Selimut beton :  $s = 0.10 \times d$
- Spasi gelagar :  $S_g = 2.75 \text{ m}$
- Spasi sengkang :  $s_v$  dihiung
- Tebal slab :  $t_s = 0.20 \text{ m} = 20 \text{ cm}$
- Tebal aspal :  $t_p = 0.06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$
- Luas per strand :  $a_p = 98.7 \text{ mm}^2$
- Area of mild steel :  $A_s$
- Area of stirrup :  $a_s$

#### 4.1.3 Desain Balok Beton Prategang

Desain adalah berupa penentuan besar dan eksentrisitas gaya prategang. Ini dapat dilakukan dengan metoda Magnel sebagai berikut. Pertama, tegangan pada tahap 3 adalah

$$\frac{P_0}{A} + \frac{P e_0 y_t}{l} + \frac{M_d y_t}{l} \geq f_{yy}$$

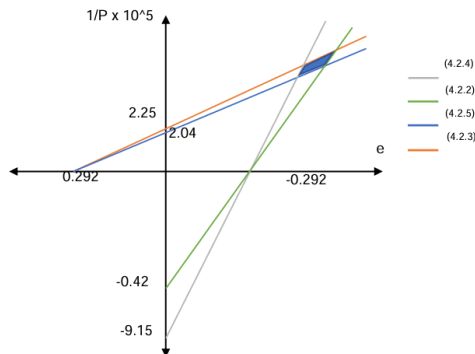
$$\frac{P_0}{A} + \frac{P e_0 y_t}{l} + \frac{M_d y_t}{l} \leq f_{tb}$$

dan tegangan pada Tahap 4 sebesar

$$\frac{P_o}{A} + \frac{Pe_0 y_t}{l} + \frac{M_t y_t}{l} \leq f_{ty}$$

$$\frac{P_o}{A} + \frac{Pe_0 y_t}{l} + \frac{M_t y_t}{l} \geq f_{tb}$$

yang digunakan untuk menentukan gaya prategang dan eksentrisitas dengan factor loss of prestress 25 %, diperoleh,  $F_0=15000 \text{ kN}$ ,  $F_e=0.75 \times 15000=11250 \text{ kN}$ ;  $e_0=-0.74 \text{ m}$



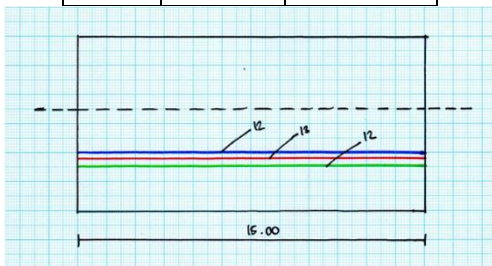
Gambar 7 Diagram Magnel

#### 4.2 Konfigurasi Strand

Untuk balok prategang pratarik, strand sebanyak 13 buah dibagi atas 3 (tiga) lapis tendon dengan posisi relatif terhadap titik berat seperti dalam Tabel dan Gambar berikut ini. Pertama, 4 strand ditempatkan pada posisi - 0.699 m dari titik pusat penampang, 5 strand pada posisi -0.74 m, 4 strand pada posisi -0.69 m, dan 4 strand pada posisi + 0.274 m.

Tabel 2 Kabel Lurus Dalam Balok Prategang Pratarik

Lapis	Jumlah	Posisi (m)
1	4	-0.79
2	5	-0.74
3	4	-0.69
Total	13	



Gambar 8 Balok Prategang Pratarik Dengan Strand Lurus

Gaya prategang dan posisi diberikan dalam Tabel di bawah ini.

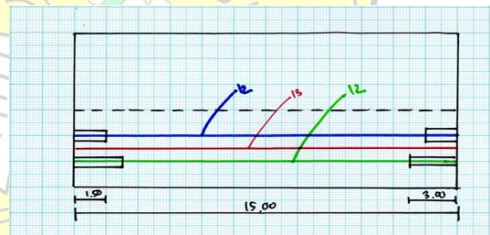
Tabel 3 Gaya Prategang dan Eksentrisitas

Tendon	n	Posisi(m)	$P_0$	$P_1$	$P_{eff}$	momen	Posisixn
1	4	0.79	4616	4155	3462	2665	3.08
2	5	0.74	5768	5190	4326	3114	3.60
3	4	0.69	4616	4155	3462	2319	2.68
total	12		15000	13500	11250	8098	

#### 4.3 Sistem Balok Beton Dengan Strand Debonded

Dalam kasus ini, strand didebonded dengan cara bertahap sebagai berikut.

- Strand lapis pertama sebanyak 4 strand didebonded sejarak  $L_{db1} = 3.50 \text{ m}$
- Lapis kedua dengan strand 5 buah, tidak didebonded
- Strand4 lapis ketiga sebanyak 4 strand didebonded sejarak  $L_{db3} = 7.0000 \text{ m}$



Gambar 9 Balok Prategang Pratarik Dengan Strand Debonded

#### 4.4 Bahasan Efektivitas Reduksi Camber

Sistem pratarik dan pasca tarik. Atas desain tersebut dilakukan minimalisasi camber, dengan tiga acara cara sebagai berikut:

- Kasus 1: Penggunaan kabel pratarik bentuk lurus dengan strand tanpa debonded
- Kasus 2: Penggunaan kabel pasca tarik berbentuk parabola
- Kasus 3: Penggunaan kabel pratarik bentuk lurus dengan strand debonded

Hasil perpindahan maksimum di tengah bentang untuk ketiga kasus ditabulasi dan diperbandingkan di dalam Tabel berikut ini.

Tabel 4 *Lendutan Tengah Bentang Balok*

Kasus	Lendutan	Simbol	Lendutan (mm)		
			Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
1	Akibat b.s. gelagar	$\Delta_{SW}$	-123.57	-123.57	-1323.57
2	Akibat gaya prategang	$\Delta_C$	+184.78	+30.42	+173.97
4	Tahap ereksi	$\Delta_E$	+q103.99	+30.42	+61.21
5	Akibat beban mati	$\Delta_{SDL}$	-123.57	-123.57	-123.57
7	Akibat beban mati	$\Delta_{DL}$	+174.26	+174.26	+174.26
8	Akibat beban hidup	$\Delta_{LL}$	70.10	-96.69	-96.69
9	Lendutan total	$\Delta_{TOT}$	+174.26	+20.431	+20.431

Atas pengamatan hasil perhitungan lendutan yang ditabulasi dalam Tabel, ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Lendutan ke atas (camber) akibat gaya prategang pada penampang tengah gelagar, lebih kecil untuk system pasca tarik dan semakin kecil untuk kasus strand yang didebonded.
- Magnitudo camber pada kasus pasca tarik, untuk kasus pratarik tanpa debonded direduksi hingga  $(184.71 \% / 43.392 = 23.15 \%$
- Magnitudo camber pada kasus pasca tarik, untuk kasus pratarik dengan debonded direduksi hingga  $(30,42) \times 100 \% / 184.78 = 16.40\%$ , namun hanya sedikit berkurang karena debonded.
- Magnitudo kamber sangat mempengaruhi magnitudo lendutan akhir sangat mempengaruhi lendutan total akhir yang terjadi.

## 5. KESIMPULAN

Camber, yang merupakan lendutan ke atas akibat gaya prategang yang menghasilkan momen negatif, tidak merusak konstruksi namun dapat mengurangi kelayakan sistem konstruksi. Oleh karena itu, langkah-langkah untuk meminimalkan camber perlu diterapkan untuk meningkatkan kualitas layanan beton prategang. Dua metode utama yang dibahas meliputi penggunaan kabel atau tendon berbentuk parabola dalam sistem prategang pascatarik, serta penggunaan

strand deboned dalam sistem prategang pratarik. Selain itu, teorema terkait penggunaan kabel debonded telah dijelaskan, dan contoh penerapan kedua metode tersebut juga disajikan sebagai solusi untuk meminimalkan amplitudo camber.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung kami dalam penyusunan makalah ini, terutama para sahabat, keluarga, dosen, dan rekan kerja yang tak henti-hentinya memberikan semangat dan nasehat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bruggeling, A., *Partially Prestressed Concrete Structures - A Design Challenge*.
- Choudary, K., dan Saleem, A., "Application of Partial Prestressing for Crack Control in Reinforced Concrete Structures" (2019).
- Hariandja, B. H., *Analisis dan Perencanaan Struktur Beton Prategang*, Penerbit Universitas Pancasila, Jakarta (2013)
- Hariandja, B. H., *Analisis dan Perencanaan Struktur Beton Bertulang*, Penerbit Universitas Pancasila, Jakarta (2013)
- Hariandja, B. H., *Mekanika Rekayasa III: Analisis Struktur Dengan Metoda Gaya dan Metoda Perpindahan*, Penerbit Institut Teknologi Bandung, Bandung (2015)
- Honarvar, E., dan Sritharan, S. (2015). *Improving the Accuracy of Camber Predictions for Precast Pretensioned Concrete Beams: Final Report*.
- Karschner, K. A., & Scanlon, A., *Effects of Creep and Shrinkage on Time-Dependent Strain and Curvature of R/C Members*, (2012).



- Lin, T.Y., *Design of Prestressed Concrete Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1963).
- Nainggolan, T. M. (2018). *Investigasi Kegagalan Balok Beton Prategang Tol Becakayu*, Bandung, West Java, Indonesia (2018).
- Nawy, E. G. *Beton Prategang, edisi ketiga* (2001)
- Nurjaman, H.N., *Catatan Kuliah Program Studi Teknik Sipil*, Universitas Persada Indonesia, Jakarta (2022)
- Precast/Prestressed Concrete Institute. *PCI Design Handbook, Precast and Prestressed Concrete, edisi ketujuh* (2008)
- SNI 1725:2016 *Pembebanan Untuk Jembatan*.
- SNI 7833 - 2012 *Tata Cara Perancangan Beton Pracetak dan Beton Prategang Untuk Bangunan Gedung*.
- SNI 2847 2013 *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*.
- Tadros, M. K., Fawzy, F., dan Hanna, K. E., *Prestressed Girder Camber Variability* (2011)
- Wicaksana, S., *Partial Stressing Method in Post Tension Prestressed Concrete System*, thesis sarjana, President University, Cikarang (2021).
- Wijiastuti, Y., dan Fatniawati, N., *Analisis Lendutan Beton Prategang Parsial Pada Gelagar Jembatan Dengan Metode Approximate Time Step*, Yogyakarta (2003)