

TINJAUAN VARIASI DIMENSI BALOK PRATEGANG PENAMPANG I PADA GELAGAR MEMANJANG JEMBATAN

Johanes Januar Sudjati¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44 Yogyakarta
Email: januar@mail.uajy.ac.id

ABSTRAK

Balok prategang penampang I sering digunakan sebagai gelagar memanjang jembatan karena memiliki beton yang dikonsentrasikan dekat tepi terluar sehingga lebih efektif memberikan gaya tekan baik pada saat peralihan (*initial condition*) maupun saat beban total telah bekerja (*service condition*). Setiap perusahaan pembuat balok prategang biasanya telah memiliki standar dimensi penampang I yang diproduksi oleh perusahaan tersebut. Dalam studi ini akan dikaji variasi dimensi balok prategang penampang I yang digunakan sebagai gelagar memanjang jembatan. Lima bentuk penampang I dengan setiap penampang memiliki empat variasi perbandingan lebar badan dan lebar flens (b_w/b_f) serta perbandingan tebal flens dan tinggi balok (t_f/h) diterapkan pada jembatan dengan bentang antara 10 m sampai dengan 40 m. Ditinjau gaya prategang dan eksentrisitas tendon yang dibutuhkan, tegangan saat *initial* dan *service condition*, kuat lentur dan kuat geser balok serta lendutan yang terjadi. Dari hasil perhitungan diperoleh balok penampang I dengan lebar flens atas dua kali lebar flens bawah memiliki kinerja/hasil yang lebih baik dibanding bentuk penampang yang lain kecuali saat *initial condition*. Pada *initial condition* balok penampang I dengan lebar flens atas setengah dari lebar flens bawah memiliki tegangan yang terkecil.

Kata kunci: penampang I, tegangan, kuat lentur, kuat geser, lendutan

1. PENDAHULUAN

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 (Lin dan Burns, 1993). Sistem prategang biasanya dilakukan dengan cara memberikan tegangan tekan pada lokasi yang akan mengalami tegangan tarik akibat beban eksternal. Bentuk-bentuk penampang yang sering digunakan untuk beton prategang adalah penampang I simetris, penampang I tidak simetris, penampang T dan penampang kotak (box). Balok prategang penampang I sering digunakan sebagai gelagar memanjang jembatan karena memiliki beton yang dikonsentrasikan dekat tepi terluar sehingga lebih efektif memberikan gaya tekan baik pada saat peralihan (*initial condition*) maupun saat beban total telah bekerja (*service condition*). Semakin banyak beton yang dikonsentrasikan dekat tepi terluar maka semakin besar lengan momen yang dimiliki sehingga kuat lentur balok semakin besar. Setiap perusahaan pembuat balok prategang biasanya telah memiliki standar dimensi penampang I yang diproduksi oleh perusahaan tersebut. Dalam studi ini akan dikaji variasi dimensi balok prategang penampang I yang paling sesuai untuk digunakan sebagai gelagar memanjang jembatan.

2. LANDASAN TEORI

Desain penampang untuk memikul momen lentur

Desain balok prategang untuk memikul momen lentur diawali dengan desain pendahuluan (*preliminary design*) untuk memperoleh perkiraan gaya prategang dan luas tendon yang dibutuhkan.

$$P_e = \frac{M_T}{0,65 h} \quad (1)$$

$$A_{ps} = \frac{P_e}{f_{pe}} \quad (2)$$

P_e adalah gaya prategang efektif, M_T adalah momen lentur akibat beban total, h adalah tinggi penampang balok, A_{ps} adalah luas tendon dan f_{pe} adalah prategang efektif. Setelah desain pendahuluan dilanjutkan dengan desain akhir dengan mengijinkan tegangan tarik, untuk memperoleh gaya prategang dan eksentrisitas tendon yang digunakan.

$$e = k_b + \frac{M_G + f_t S_t}{P_i} \quad (3)$$

$$P_e = \frac{M_T - f_b S_b}{e + k_t} \quad (4)$$

e adalah eksentrisitas tendon, k_t adalah batas atas kern, k_b adalah batas bawah kern, M_G adalah momen lentur akibat berat sendiri, f_t adalah tegangan ijin tarik saat *intial condition*, f_b adalah tegangan ijin tarik saat *service condition*, S_t adalah modulus penampang elastis tepi atas, S_b adalah modulus penampang elastis tepi bawah dan P_i adalah gaya prategang awal. Luas minimum (A_c) penampang balok yang dibutuhkan diambil sebagai nilai terbesar dari persamaan (5) dan (6) berikut.

$$A_c = \frac{P_i h}{f'_b y_t - f_t y_b} \quad (5)$$

$$A_c = \frac{P_e h}{f_t y_b - f_b y_t} \quad (6)$$

f'_b adalah tegangan ijin tekan saat *initial condition*, f_t adalah tegangan ijin tekan saat *service condition*, y_t adalah jarak titik berat penampang ke tepi atas dan y_b adalah jarak titik berat ke tepi bawah penampang.

Tegangan penampang balok

Tegangan yang terjadi pada penampang balok saat *initial condition* (ketika gaya prategang baru bekerja pada penampang balok) dapat dihitung dengan persamaan (7) dan (8) berikut.

$$f_{tepi\ atas} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{e y_t}{r^2}\right) - \frac{M_G}{S_t} \quad (7)$$

$$f_{tepi\ baeah} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e y_b}{r^2}\right) + \frac{M_G}{S_b} \quad (8)$$

Tegangan pada penampang balok saat *service conditon* (ketika beban total telah bekerja pada balok) dihitung dengan persamaan (9) dan (10).

$$f_{tepi\ atas} = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e y_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S_t} \quad (9)$$

$$f_{tepi\ baeah} = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e y_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \quad (10)$$

r^2 adalah radius girasi penampang balok.

Menurut peraturan AASHTO (Nawy, E.G., 2001) tegangan ijin pada penampang ditetapkan sebagai berikut:

saat *initial conditon*: tegangan ijin desak = $0,55 f'_c$

tegangan ijin tarik = $0,25 \sqrt{f'_c}$

saat *service conditon*: tegangan ijin desak = $0,4 f'_c$

tegangan ijin tarik = $0,5 \sqrt{f'_c}$

f'_{ci} adalah kuat tekan beton saat gaya prategang mulai bekerja pada penampang balok.

Kuat lentur penampang

Pada kondisi batas nilai tegangan luluh tendon tidak diketahui dengan pasti, sebagai gantinya digunakan persamaan (11) untuk menghitung tegangan tendon guna mencari nilai kuat lentur penampang.

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right) \quad (11)$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b d_p} \quad (12)$$

$$\omega = \rho \frac{f_y}{f_c'} \quad ; \quad \rho = \frac{A_s}{b d} \quad (13)$$

$$\omega' = \rho' \frac{f_y}{f_c'} \quad ; \quad \rho' = \frac{A_s'}{b d} \quad (14)$$

f_{pu} adalah tegangan ultimit tendon, γ_p adalah faktor yang memperhitungkan tipe tendon, β_1 adalah faktor pengali, b adalah lebar daerah tekan beton, d adalah jarak dari tulangan baja ke tepi terluar daerah tekan beton, d_p adalah jarak dari tendon ke tepi terluar daerah tekan beton, ρ_p adalah rasio tendon, ρ adalah rasio tulangan tarik dan ρ' adalah rasio tulangan tekan.

Jika tulangan baja tidak diperhitungkan maka nilai ω dan ω' dalam persamaan (11) sama dengan nol. Kuat lentur penampang dengan mengabaikan tulangan baja dihitung dengan persamaan (15).

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (15)$$

M_n adalah kuat lentur penampang dan a adalah tinggi blok daerah tekan beton.

Kuat geser penampang

Kuat geser beton dari balok prategang diambil dari nilai terkecil dari persamaan (16) dan (17).

$$V_{cw} = 0,3 \left(\sqrt{f_c'} + f_{pc} \right) b_w d + V_p \quad (16)$$

$$V_{ci} = \frac{\sqrt{f_c'}}{20} b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{maks}} \quad (17)$$

f_{pc} adalah tegangan tekan pada titik berat penampang akibat beban luar, b_w adalah lebar badan balok, V_p adalah komponen vertikal gaya prategang efektif, V_d adalah gaya geser akibat beban mati tidak berfaktor, V_i adalah gaya geser terfaktor akibat beban luar, M_{cr} adalah momen retak akibat beban luar dan M_{maks} adalah momen terfaktor maksimum akibat beban luar.

Lendutan balok

Lendutan total yang terjadi pada balok prategang merupakan superposisi antara lendutan ke atas akibat gaya prategang dan lendutan ke bawah akibat beban yang bekerja pada balok. Lendutan ke atas akibat gaya prategang dihitung dengan persamaan (18).

$$\delta_1 = - \frac{P_e L^2}{8EI} \left\{ e_2 + \frac{5}{6} (e_1 - e_2) \right\} \quad (18)$$

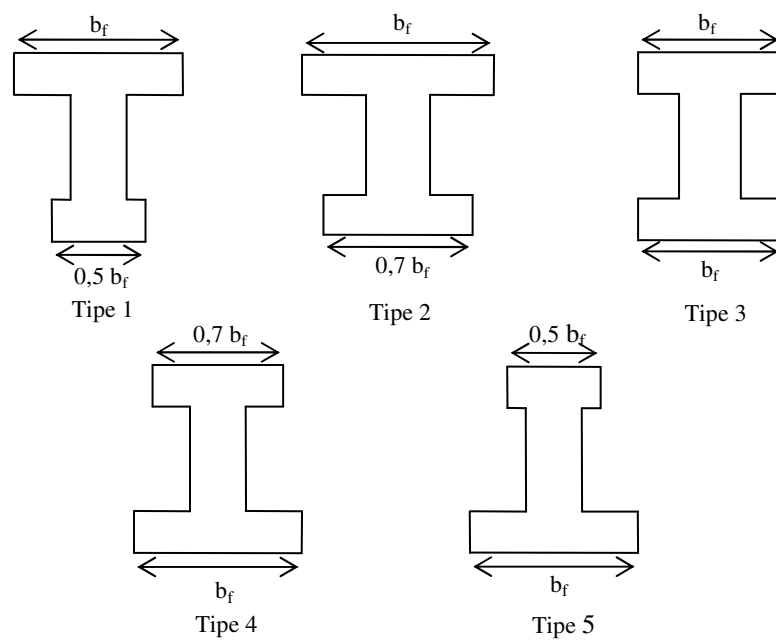
L adalah bentang balok, EI adalah kekakuan lentur balok, e_1 adalah eksentrisitas tendon di tengah bentang dan e_2 adalah eksentrisitas tendon di ujung balok. Lendutan ke bawah akibat beban terbagi rata w yang bekerja pada balok dihitung dengan persamaan (19) berikut.

$$\delta_2 = + \frac{5 w L^4}{384EI} \quad (19)$$

3. DATA ANALISIS

Dalam studi ini akan ditinjau variasi dimensi balok prategang penampang I yang digunakan sebagai gelagar memanjang jembatan. Jembatan yang ditinjau memiliki perletakan sendi dan rol dengan variasi bentang 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m dan 40 m. Gelagar memanjang merupakan beton prategang pracetak dengan jarak antar gelagar 2,3 m. Penarikan tendon dilakukan dengan cara pascatarikan (*posttensioning*) dan dilakukan *grouting*, saat itu yang bekerja baru berat sendiri balok. Pelat lantai jembatan setebal 25 cm dipasang di atas gelagar, tebal lapisan aspal 6 cm dan lebar trotoar 1 m. Mutu beton $f'_c = 50$ MPa, mutu beton saat *initial condition* $f'_{ci} = 40$ MPa, tegangan ultimit tendon $f_{pu} = 1860$ MPa, kehilangan prategang 20 %, prategang awal tendon $f_{pi} = 1300$ MPa. Jenis tendon yang digunakan adalah *strand* tujuh kawat dengan diameter *strand* 15,2 mm.

Untuk setiap bentang dicoba lima tipe penampang I dengan luas yang sama seperti pada gambar 1. Luas penampang balok untuk setiap bentangnya dapat dilihat pada tabel 1. Setiap tipe penampang memiliki empat variasi perbandingan lebar badan dan lebar flens (b_w/b_f) serta perbandingan tebal flens dan tinggi balok (t_f/h) seperti pada tabel 2. Ditinjau gaya prategang dan eksentrisitas tendon yang dibutuhkan, tegangan saat *initial* dan *service condition*, kuat lentur dan kuat geser balok serta lendutan yang terjadi.



Gambar 1. Lima tipe penampang

Tabel 1. Luas penampang balok

Bentang (m)	Luas penampang balok (mm ²)
10	275.000
15	350.000
20	450.000
25	700.000
30	850.000
35	1.000.000
40	1.250.000

Tabel 2. Perbandingan b_w/b_f dan t_f/h

Variasi	b_w/b_f	t_f/h
a	0,2	0,1
b	0,2	0,2
c	0,3	0,1
d	0,3	0,2

Ket.: b_w adalah lebar badan balok
 b_f adalah lebar flens
 t_f adalah tebal flens
 h adalah tinggi balok

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gaya prategang dan eksentrisitas tendon

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai P_i (gaya prategang awal) dan e (eksentrisitas tendon) di tengah bentang seperti pada tabel 3. Nilai P_i dalam tabel merupakan nilai terkecil dari keempat variasi dimensi untuk setiap tipe penampang.

Tabel 3. Gaya prategang dan eksentrisitas tendon

L (m)	Tipe penampang									
	1		2		3		4		5	
	Pi (kN)	e (mm)	Pi (kN)	e (mm)	Pi (kN)	e (mm)	Pi (kN)	e (mm)	Pi (kN)	e (mm)
10	973.13	617.54	869.50	621.70	808.44	570	836.32	518.00	874.37	476.40
15	1,964.49	662.77	1,788.82	684.33	1,626.27	670	1,709.83	607.34	1,823.43	542.97
20	3,046.89	768.37	2,796.70	792.00	2,577.29	770	2,697.61	702.00	2,867.26	636.35
25	4,301.95	929.60	4,154.67	872.00	4,034.20	800	4,200.86	728.00	4,393.74	670.40
30	5,712.09	1044.00	5,597.03	980.00	5,455.82	900	5,683.48	820.00	5,942.95	756.00
35	7,269.94	1158.40	7,138.32	1088.00	6,977.15	1000	7,270.05	912.00	7,600.32	841.60
40	9,194.91	1272.80	9,031.79	1196.00	8,832.15	1100	9,201.55	1004.00	9,617.30	927.20

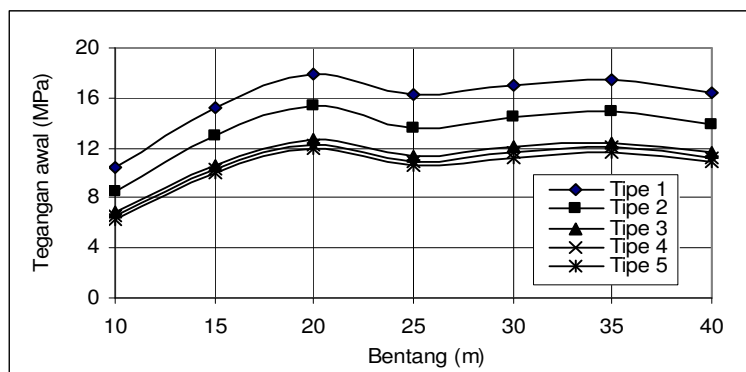
Tegangan penampang balok

Tegangan tekan yang terjadi di tepi penampang balok pada tengah bentang dapat dilihat pada tabel 4, gambar 2 dan gambar 3. Nilai yang tercantum dalam tabel merupakan tegangan terkecil dari keempat variasi dimensi untuk setiap tipe penampang.

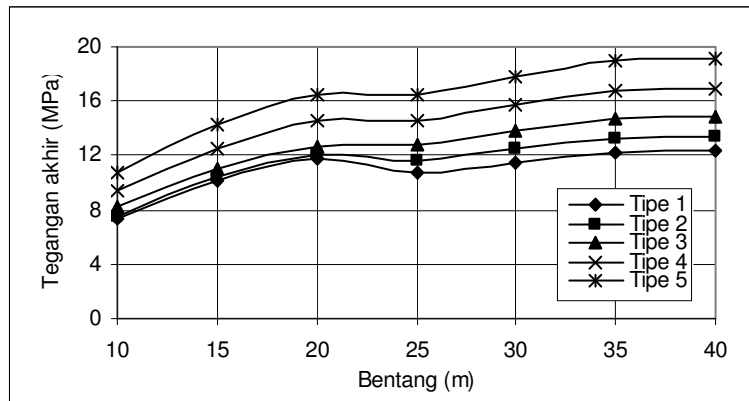
Tabel 4. Tegangan tekan pada penampang balok

L (m)	Initial conditon					Service condition				
	Tipe penampang					Tipe penampang				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
10	10.38	8.52	6.80	6.52	6.27	7.29	7.53	8.24	9.44	10.67
15	15.23	12.97	10.58	10.33	9.98	10.16	10.43	10.96	12.55	14.32
20	17.93	15.37	12.62	12.30	11.97	11.73	12.03	12.70	14.50	16.46
25	16.26	13.61	11.31	10.91	10.57	10.73	11.56	12.76	14.59	16.46
30	16.96	14.44	12.03	11.61	11.26	11.40	12.50	13.81	15.78	17.80
35	17.51	14.92	12.46	12.03	11.66	12.20	13.30	14.70	16.80	18.94
40	16.38	13.92	11.59	11.18	10.83	12.32	13.42	14.85	16.96	19.11

Satuan: MPa



Gambar 2. Tegangan tekan saat *initial condition*



Gambar 3. Tegangan tekan saat *service condition*

Saat *initial condition* penampang balok tipe 5 variasi b memiliki tegangan yang terkecil karena penampang ini memiliki luas daerah tekan yang lebih besar di bagian bawah. Dari gambar 2 juga dapat dilihat balok penampang 3,4 dan 5 memiliki tegangan yang hampir sama di semua bentang. Saat *service condition* tegangan terkecil terjadi di penampang tipe 1 variasi b yang memiliki luas daerah tekan yang lebih besar di bagian atas. Pada bentang 10 m sampai dengan 20 m balok penampang 1, 2 dan 3 memiliki tegangan yang hampir sama seperti terlihat pada gambar 3.

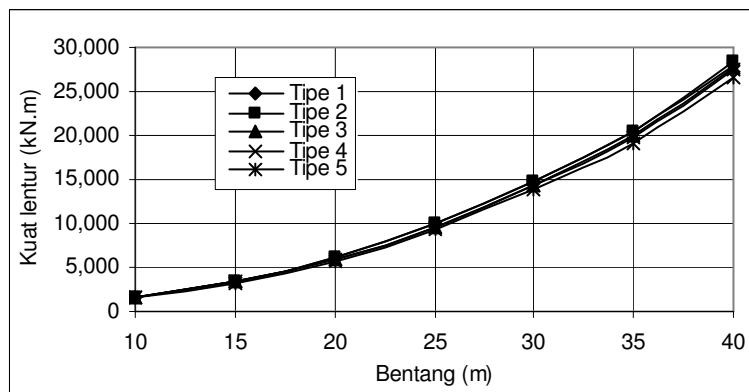
Kuat lentur

Kuat lentur balok di tengah bentang dapat dilihat pada tabel 5 dan gambar 4. Kuat lentur yang tercantum dalam tabel 5 merupakan nilai terbesar dari keempat variasi dimensi untuk setiap tipe penampang.

Tabel 5. Kuat lentur balok

L (m)	Tipe penampang				
	1	2	3	4	5
10	1,650.52	1,677.93	1,512.04	1,557.88	1,536.69
15	3,488.54	3,508.75	3,368.13	3,416.33	3,281.35
20	6,057.58	6,129.81	5,933.17	5,936.72	5,706.49
25	9,934.28	10,033.86	9,586.06	9,655.07	9,270.55
30	14,783.53	14,853.64	14,303.24	14,300.07	13,763.32
35	20,480.65	20,508.96	19,996.99	19,861.18	19,139.90
40	28,051.79	28,388.50	27,686.43	27,470.41	26,480.30

Satuan: kN.m



Gambar 4. Kuat lentur penampang

Kuat lentur dari kelima tipe penampang pada setiap bentang terlihat tidak berbeda jauh. Penampang balok tipe 2 variasi c memperlihatkan kuat lentur yang sedikit lebih besar dibanding tipe lainnya. Sedangkan penampang tipe 5 menunjukkan kuat lentur yang sedikit lebih kecil dibanding tipe penampang yang lain.

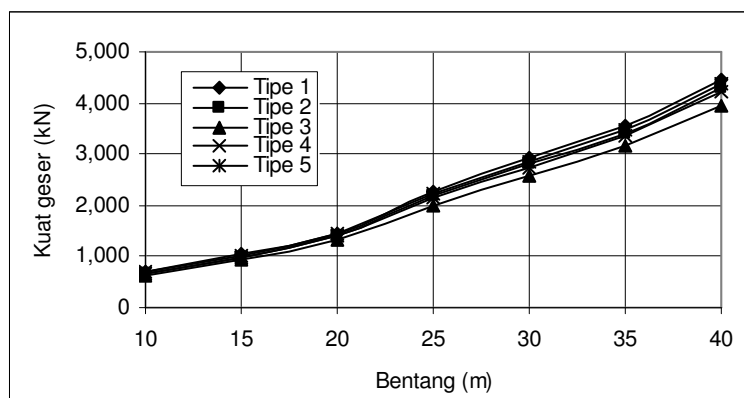
Kuat geser balok

Kuat geser balok dapat dilihat pada tabel 6 dan gambar 5. Kuat geser yang tercantum dalam tabel 6 merupakan nilai terbesar dari keempat variasi dimensi untuk setiap tipe penampang.

Tabel 6. Kuat geser balok

L (m)	Tipe penampang				
	1	2	3	4	5
10	704.38	671.59	632.91	663.23	686.85
15	1,036.94	993.57	933.80	986.40	1,022.83
20	1,456.41	1,398.69	1,315.33	1,394.14	1,448.17
25	2,276.34	2,186.72	2,010.36	2,152.58	2,216.58
30	2,937.08	2,808.00	2,567.10	2,751.49	2,837.13
35	3,564.50	3,413.73	3,146.01	3,374.70	3,483.40
40	4,470.19	4,282.36	3,947.84	4,237.45	4,377.28

Satuan: kN



Gambar 5. Kuat geser balok

Kuat geser terbesar di setiap bentang dimiliki oleh penampang tipe 1 variasi c. Perbedaan kuat geser dari kelima tipe penampang terlihat sangat kecil pada bentang 10 m – 20 m, saat bentang 25 m ke atas penampang tipe 3 menunjukkan kuat geser yang lebih kecil dibanding penampang lainnya.

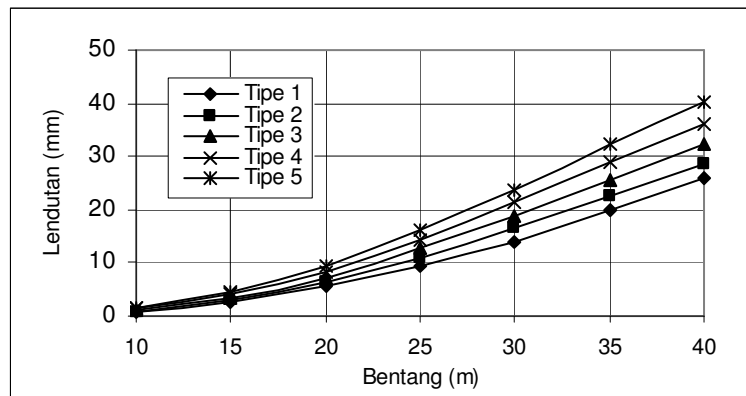
Lendutan balok

Lendutan balok dapat dilihat pada tabel 7 dan gambar 6. Lendutan yang tercantum dalam tabel merupakan nilai terkecil dari keempat variasi dimensi untuk setiap tipe penampang. Penampang balok tipe 1 variasi b memiliki lendutan yang lebih kecil dari kelima tipe penampang sedangkan lendutan terbesar terjadi pada penampang tipe 5. Semakin besar bentang balok terlihat selisih lendutan kelima tipe penampang juga semakin besar.

Tabel 7. Lendutan balok

L (m)	Tipe penampang				
	1	2	3	4	5
10	0.63	0.84	1.10	1.32	1.51
15	2.59	2.99	3.52	4.11	4.70
20	5.81	6.41	7.33	8.45	9.51
25	9.27	11.00	12.75	14.45	16.11
30	13.95	16.39	18.80	21.24	23.67
35	20.10	22.58	25.60	28.88	32.15
40	25.82	28.69	32.22	36.26	40.31

Satuan: mm



Gambar 6. Lendutan balok

5. KESIMPULAN

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa balok prategang penampang I dengan lebar flens atas dua kali lebar flens bawah memiliki kinerja/hasil yang lebih baik dibanding bentuk penampang yang lain kecuali saat *initial condition*. Pada *initial condition* balok penampang I dengan lebar flens atas setengah dari lebar flens bawah memiliki tegangan yang terkecil.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Balitbang Departemen PU (2004). RSNI-T-12-2004 *Perencanaan struktur beton untuk jembatan*
 Balitbang Departemen PU (2005). RSNI-T-02-2005 *Standar pembebanan untuk jembatan*
 Lin, T.Y. dan Burns, H. (1993). *Desain struktur beton prategang*. Erlangga, Jakarta.
 Nawy, Edward G. (2001). *Prestressed concrete a fundamental approach*. Prentice Hall, New Jersey.